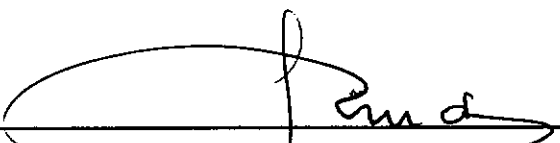


**TAPETES IMPERMEABILIZANTES A MONTANTE DE BARAGENS
SOBRE ALUVIÕES PERMEÁVEIS**

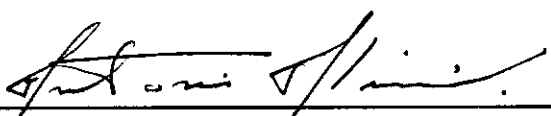
FRANCISCO CHAGAS DA SILVA FILHO

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSARIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIENCIAS
EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



PROF. SANDRO S. SANDRONI, Ph.D
(PRESIDENTE)



PROF. ANTÔNIO NUNES DE MIRANDA, Ph.D



PROF. FRANCISCO DE REZENDE LOPES, Ph.D



PROF. JOSE ROBERTO THEDIM BRANDT, Ph.D

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
MAIO DE 1991

SILVA FILHO, FRANCISCO CHAGAS DA

Tapetes Impermeabilizantes a Montante de Barragens sobre
Aluviões Permeáveis (Rio de Janeiro) 1991

xiv, 107 p. 29.7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia
Civil, 1991

Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Tapetes Impermeabilizantes

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

RESUMO DA TESE APRESENTADA À COPPE/UFRJ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M. Sc.)

**TAPETES IMPERMEABILIZANTES A MONTANTE DE BARRAGENS
SOBRE ALUVIÕES PERMEÁVEIS**

FRANCISCO CHAGAS DA SILVA FILHO
MAIO, 1991

Orientador: Sandro S. Sandroni

Có-orientador: Antônio Nunes de Miranda

Programa: Engenharia Civil

São apresentados neste trabalho os principais dispositivos de controle de percolação pela fundação permeável de barragens. Utilizou-se do Método dos Elementos Finitos (MEF) para verificação dos métodos de dimensionamento de tapetes.

Foram realizadas simulações via MEF, com o uso de duas barragens fictícias. Verificou-se a aproximação dos métodos de dimensionamento de tapetes quanto a vazão, gradientes, comprimento efetivo e seção transversal. Concluiu-se que a seção transversal de forma triangular apresenta-se como a mais eficiente e mais viável economicamente.

Avaliou-se também, duas formas de vales distintas. Um com alargamento a montante da barragem e outro sem o alargamento. Propôs-se então, um roteiro para projeto de tapetes a partir das conclusões obtidas nas simulações.

Foi feita também, uma aplicação com dados reais de uma barragem (Barragem do Carão) sobre fundação permeável que utiliza o tapete como redutor de percolação, sendo comparados os dados reais com os de Bennett (comprimento efetivo) e do MEF.

ABSTRACT OF THESIS PRESENTED TO COPPE/UFRJ AS PARTIAL
FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF MASTER OF
SCIENCE (M.Sc.)

IMPERMEABLE BLANKETS AT THE UPSTREAM SIDE OF DAMS
OVER PERMEABLE ALLUVIUM

FRANCISCO CHAGAS DA SILVA FILHO

MAY, 1991

Chairman: Sandro S. Sandroni

Vice Chairman: Antônio Nunes de Miranda

Department: Civil Engineering

This work presents the principal solutions for of seepage control on pervious dam foundations. The Finite Elements Method (FEM) was used for the verification of blanket dimensioning methods.

Various simulations were undertaken via FEM with the use of two fictitious dams. The blanket dimensioning methods were verified with respect to leakage, upward gradient, effective length and cross section. It was concluded that the triangular cross section is the most efficient and economically viable.

Two distinct valley forms were also evaluated. One with widening at the upstream side of the dam and the other without. A blanket design method based on the results obtained in the simulation is proposed.

An evaluation of a real situation was also done using data from an existing dam (the Carão dam) over a pervious foundation that uses the upstream blanket as a percolation control method. The dam data is compared with that presented by Bennett (effective length) and of the FEM.

Aos meus pais
À Eline, Dante e Danton

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores prof. Sandro S. Sandroni e Antônio Nunes de Miranda, grandes responsáveis pela conclusão deste trabalho.

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS que tanto me apoiou, na pessoa do engenheiro Luiz Hernani de Carvalho.

Ao prof. Francisco de Rezende Lopes pela gentileza de ter dado uma cópia do programa FPM500 e pelas orientações para a sua utilização.

Ao prof. Macário da Universidade Federal do Ceará, pela revisão do capítulo de elementos finitos.

Ao prof. Mardônio, também da Universidade Federal do Ceará, pela organização de um seminário preliminar a apresentação da tese.

Aos colegas de trabalho, engenheira Eliane Isidoro, engenheiro José Nilton e o arquiteto Nelson Serra, que dentro de suas possibilidades contribuíram para a realização dos trabalhos.

Ao arquiteto Paulo Roberto, responsável pelos desenhos apresentados.

Aos professores da COPPE.

A todos os colegas, alunos da COPPE, e em especial aos amigos com os quais morei em república.

ÍNDICE

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO.....	1
CAPÍTULO II - CONTROLE DE PERCOLAÇÃO PELA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM.....	5
II.1 - Dispositivos de interceptação total da percolação.....	6
II.2 - Dispositivos de interceptação parcial da percolação	15
II.3 - Elementos Drenantes.....	20
CAPÍTULO III - MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS.....	30
III.1 - Enfoques Matemáticos dos Métodos Discretos.....	30
III.2 - Aplicação do MEF a percolação.....	40
III.3 - O programa FPM500.....	42
CAPÍTULO IV - MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE TAPETES.....	45
IV.1 - Apresentação dos métodos para o dimensionamento de tapetes.....	46
IV.2 - Análise pelo Método dos Elementos Finitos.....	54
IV.3 - Conclusão.....	60
CAPÍTULO V - ROTEIRO PARA PROJETO DE TAPETE IMPERMEABILIZANTE.....	72
V.1 - Tapete sobre fundação permeável homogênea.....	73
V.2 - Tapete sobre fundação permeável com camada superficial de menor permeabilidade.....	76
V.3 - Observações finais.....	81
CAPÍTULO VI - BARRAGEM DO CARXO.....	88
VI.1 - Análise pelo Método dos Elementos Finitos.....	89
VI.2 - Comparação com o Método de Bennett.....	91
VI.3 - Conclusão.....	92

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES E PESQUISAS RECOMENDADAS.....	98
VII.1 - Conclusões.....	98
VII.2 - Pesquisas recomendadas.....	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE FIGURAS

- Figura II.1 Trincheira de solo compactado
- Figura II.2 Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Açú)
- Figura II.3 Posições de projeto de um "cut-off"
- Figura II.4 Trincheira de lama ("Slurry Trench")
- Figura II.5 Diafragma de concreto
- Figura II.6 Cortina de estacas prancha
- Figura II.7 Eficiência de uma cortina de injeções, verificada pela posição da superfície livre (Apud Cedergreen, 1972)
- Figura II.8 "Cut-off" de penetração parcial
- Figura II.9 Tapete impermeabilizante a montante
- Figura II.10 Dreno de pé, valas e tapetes drenantes
- Figura II.11 Poço de alívio
- Figura III.1 Fio esticado com carregamento triangular
- Figura III.2 Discretização do fio
- Figura IV.1 Desenho esquemático de uma barragem com tapete sobre fundação permeável
- Figura IV.2 Relação entre o comprimento de percolação e a espessura da camada permeável na definição do comprimento médio de percolação

- Figura IV.3 Gradiente de saída em fundação homogênea sem camada superior de menor permeabilidade
- Figura IV.4 Gradiente de saída em fundação homogênea com camada superior de menor permeabilidade
- Figura IV.5 Comprimento efetivo de um tapete (X_r)
- Figura IV.6 Reta $aL = \sqrt{2}$ que caracteriza os comprimentos ótimos para cada tapete
- Figura IV.7 Malha de Elementos Finitos I
- Figura IV.8 Malha de Elementos Finitos II
- Figura IV.9 Influência do comprimento do trecho de entrada da malha
- Figura IV.10 Cálculo da vazão (Darcy, Pavlovsky-Dachler, Turnbull e Mansur e MEF)
- Figura IV.11 Variação do gradiente de saída com a anisotropia do solo de fundação
- Figura IV.12 Tapete retangular com seu comprimento efetivo calculado por Bennett e pelo MEF
- Figura IV.13 Tapete triangular de mesma área de um retangular de comprimento efetivo calculado por Bennett e pelo MEF
- Figura IV.14 Tapete retangular de comprimento ótimo e outro triangular de mesma área para vários comprimentos. Pontos de mesma eficiência
- Figura IV.15 Tapete retangular de comprimento ótimo e mesmo comprimento de um triangular. Ponto de mesma eficiência com redução de área do tapete

triangular com relação ao retangular

- Figura V.1 Desenho esquemático dos vales nordestinos
 (a) com alargamento
 (b) sem alargamento
- Figura V.2 Comprimento efetivo determinado pela vazão
 máxima admissível
- Figura V.3 Comprimento efetivo determinado pelo gradiente
 máximo admissível
- Figura V.4 Determinação do parâmetro "a" e do comprimento
 real do tapete retangular
- Figura V.5 Vale nordestino (característico) totalmente
 desenvolvido
 (a) Solução regional (corte AA)
 (b) Solução regional (corte BB)
- Figura V.6 Simbologia adotada no item V.2 (Tapete sobre
 Fundação Permeável com Camada Superficial de
 Menor Permeabilidade)
- Figura VI.1 Seção típica da Barragem do Carão
- Figura VI.2 Localização dos piezômetros da Barragem do Carão
- Figura VI.3 Gradiente na fundação da barragem
- Figura VI.4 Localização e forma adotada para a camada de
 silte
- Figura VI.5 Malha de Elementos Finitos

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1 Custo de dispositivos de controle de percolação do México (em dólares). Apud Marsal e Resendiz, 1971

Tabela IV.1 Condições de percolação nos diques do Rio Mississippi

Tabela IV.2 Coeficientes de Lane

Tabela IV.3 Fatores de Segurança de Khosla

Tabela IV.4 Critérios de Istomina

LISTA DE SÍMBOLOS

- Q - Vazão percolante pela fundação
 K_o - Permeabilidade da fundação
 K_f - Permeabilidade da fundação
 K - Permeabilidade do "cut-off"
 K_i - Permeabilidade da zona injetada
 K_x - Permeabilidade na direção do eixo x
 K_y - Permeabilidade na direção do eixo y
 K_b - Permeabilidade do tapete
 K_{fh} - Permeabilidade da fundação na horizontal
 K_h - Permeabilidade na horizontal
 K_{fv} - Permeabilidade da fundação na vertical
 K_v - Permeabilidade na vertical
 d - Profundidade de penetração do "cut-off"
 w - largura do fundo do "cut-off"
 B - Caminhamento total da água
 D - Espessura da fundação
 H - Carga hidráulica disponível
 E - Espessura média do "cut-off"
 W - Área total de defeitos no dispositivo redutor de percolação por metro longitudinal
 T - Tensão no fio esticado
 y_i - deflexão no fio
 $w(x)$ - Carregamento distribuído linearmente ou triangular
 w_o - parâmetro que define o carregamento maior da distribuição
 L - Comprimento do fio
 A - Coeficiente da parábola da solução aproximada
 $R(x)$ - Residual
 I - Integral do quadrado do residual
 W_i - Termo de uma série do método de Galerkin
 EP - Energia potencial no fio
 Δx - Deformação do fio
 δ - Variação da grandeza
 ϕ - Potencial
 J - Funcional

- q - Vazão de percolação pela superfície S_2
 V - Indicação de integral
 S_2 - Fronteira de contribuição de vazão
 N - Índice indicativo da matriz
 p - Coeficiente da equação do potencial
 B' - Comprimento de percolação criado pelo tapete
 X_r - Comprimento efetivo do tapete
 X_r' - Comprimento efetivo da camada superficial
 i_s - Gradiente vertical de saída
 L_v - Comprimento vertical de percolação
 L_h - Comprimento horizontal de percolação
 ΔH - Carga hidráulica disponível
 i_c - Gradiente de saída crítico
 γ_s - Peso específico do solo de fundação
 γ_v - Peso específico da água
 e - Índice de vazios do solo de fundação
 U - Coeficiente de uniformidade do solo
 Z_b - Espessura ou altura do tapete
 Z_{b1} - Espessura da camada superficial
 Z_{b0} - Espessura transformada da camada superficial
 β - Inclinação inicial do tapete
 a - Parâmetro que caracteriza um tapete de espessura constante para determinada fundação
 α - Parâmetro que caracteriza um tapete triangular para determinada fundação
 L - Comprimento real do tapete
 L_1 - Comprimento real do tapete artificial triangular sobre a camada superficial de menor permeabilidade
 L_2 - Comprimento real do preenchimento da calha do rio
 r - Relação entre o comprimento total de percolação e a espessura da camada permeável
 n - Constante que define a superfície parabólica do tapete triangular

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A ruptura hidráulica constituiu-se numa das maiores causas de acidentes em barragens (Serafim, 1982). Com melhores técnicas construtivas e melhores equipamentos, o problema de "piping" (entubamento ou erosão regressiva) pelo corpo da barragem foi melhor controlado. Já no que diz respeito a fundação, por depender dos aspectos geológicos, a percolação não pode ser controlada com a mesma segurança que se obtém no maciço. Sendo assim, a ruptura por erosão regressiva é um problema sério a ser examinado em barragens projetadas sobre aluviões permeáveis.

Barragens sobre fundações em aluviões permeáveis são bastante comuns e ocorrem em grande número no Nordeste brasileiro (Miranda, 1983). Estes solos são formados pela deposição ao longo do vale de materiais de granulometria variada, transportados pelo rio. A velocidade das águas comandam a deposição de acordo com a granulometria. Quanto mais lento o fluxo menor a dimensão das partículas sedimentadas. Assim a granulometria dos sedimentos, e em consequência a sua permeabilidade, pode apresentar-se extremamente variável. O controle da percolação pela fundação de barragens assentes sobre aluviões permeáveis é realizado por diversos tipos de dispositivos, entre os quais pode ser citado o tapete impermeável a montante, que será tema deste trabalho.

O tapete impermeável a montante de barragens é um dispositivo de controle de percolação com o qual aumenta-se o comprimento de percolação da água, reduzindo a vazão, as forças de percolação e conseqüentemente os gradientes de saída. O tapete é uma das obras de menor custo dentre os elementos controladores de percolação pela fundação. Os estudos sobre os diques da Hidroelétrica de Samuel mostraram que a solução em tapete tinha custo 12 vezes

menor do que uma solução em "cut-off" de solo compactado (Roldão, 1989).

O tapete apresenta boa eficiência quando bem dimensionado e bem executado. Os métodos de dimensionamento de tapetes podem assumir que o mesmo seja totalmente impermeável e desta maneira obtém-se um gradiente constante no solo permeável abaixo da base do tapete. Neste caso o comprimento adicional de percolação (ou comprimento do tapete) é calculado, empregando-se a Lei de Darcy, de modo a ser obtido o gradiente ou vazão desejada. Verificando que com a aplicação simples de Darcy, não se levava em conta o percurso médio de percolação, o efeito da entrada e saída da água na fundação permeável, Pavlovsky-Dachler (citado por Davidenkof, 1964) e Turnbull e Mansur (1959), apresentaram formulações em que esta influência é considerada. Bennett (1946) assume que o tapete não é totalmente impermeável. O gradiente hidráulico na fundação é crescente de montante para jusante do tapete. Através de um roteiro matemático, Bennett obteve um comprimento efetivo do tapete, que pode ser menor ou igual ao comprimento real. Lane (1935), Istomina (citado por Breth e Günter, 1970) entre outros apresentaram critérios para o dimensionamento de barragens sobre fundações permeáveis tendo em vista os gradientes admissíveis.

Além desses métodos simplificados de cálculo, outros processos são usados como o método gráfico (redes de fluxo), métodos analógicos, modelos reduzidos e métodos numéricos. Entre os processos numéricos o Método dos Elementos Finitos, que utiliza recursos computacionais, tem boa precisão e grande abrangência.

O Método dos Elementos Finitos é considerado um método direto do cálculo das variações. Consiste em se determinar um funcional (função da função que rege o fenômeno) no qual se obtém a solução geral do contínuo com a sua minimização. O Método dos Elementos Finitos será utilizado nesta pesquisa através do programa FPM500 (Lopes,

1974) que analisa fluxos bidimensionais ou axissimétricos obedecendo a lei de Darcy. Na análise de fluxo não confinado o programa determina a posição da superfície livre por processo iterativo. Este programa foi inicialmente criado por Taylor e Brown (1967).

Esta pesquisa visa, através do Método dos Elementos Finitos, verificar por diversas simulações a aplicabilidade e limitações das formulações citadas anteriormente, usadas no dimensionamento de tapetes. Nas simulações serão adotadas duas barragens fictícias com seção tipo arbitrária. A primeira seção apresenta fluxo não confinado e a segunda com fluxo confinado.

É ainda objetivo deste trabalho a apresentação de um roteiro de dimensionamento de tapetes sobre fundações permeáveis incluindo uma proposta regional de tratamento de fundação permeável. Os vales característicos da região Nordeste são constituídos por um embasamento rochoso fraturado e alterado sob uma camada de solo residual. Na parte central do vale, acima do solo residual, encontra-se geralmente um espesso manto aluvionar grosseiro, que aflora na calha do rio. Nos terrenos laterais a calha do curso d'água, formando a planície de inundação, são encontrados sedimentos finos depositados sobre os aluviões grosseiros durante o transbordamento do rio. A solução regional proposta consiste no preenchimento da calha do rio garantindo a continuidade da camada superficial de menor permeabilidade. O preenchimento pode ser feito com o próprio material dos sedimentos finos superficiais ou pelo material que será utilizado no maciço. Após este preenchimento constrói-se o tapete sobre a camada superior de menor permeabilidade. O objetivo desta solução é obter menor volume de material tomando partido da existência de uma camada superficial de menor permeabilidade.

Inicialmente no Capítulo II é feita uma descrição dos diversos dispositivos de controle de percolação pelas fundações de barragens. São descritos: dispositivos de

interceptação total, parcial (incluindo o tapete a montante) e elementos drenantes. No Capítulo III é descrito o método matemático utilizado nesta pesquisa. O Método dos Elementos Finitos é apresentado de maneira geral e especificamente aplicado à percolação.

A primeira aplicação do programa FPM500 de Elementos Finitos é feita no capítulo IV, verificando-se os métodos de dimensionamento no tocante à vazão, gradientes, comprimento efetivo e seção transversal. Toma-se partido da abrangência do método analisando-se diversas situações. No capítulo V é apresentado um roteiro de dimensionamento de tapetes sobre fundações permeáveis. É descrito a sequência de cálculo para tapetes sobre fundação sem camada superficial de menor permeabilidade aplicada a vales com alargamento e sem o alargamento. Também apresenta-se o roteiro para os tapetes sobre fundações com camada superficial de menor permeabilidade, mostrando-se aí a solução regional proposta.

No Capítulo VI o programa é aplicado na análise de uma situação real. A Barragem do Carão (DNOCS, 1982), situada no Município de Tamboril-Ceará (barragem de terra homogênea) assente sobre um manto aluvionar bastante heterogêneo, possui um "cut-off" parcial de solo compactado e um tapete impermeável a montante. Os dados de instrumentação (piezômetros) são utilizados para ajuste das permeabilidades dos materiais. Em seguida o Método de Bennett é comparado com os resultados das simulações. Finalizando no capítulo VII são apresentadas as conclusões obtidas e sugestões para novas pesquisas.

CAPÍTULO II

CONTROLE DE PERCOLAÇÃO PELA FUNDAÇÃO DE UMA BARRAGEM

O projeto e a construção de barragens de terra devem obedecer aos seguintes critérios para garantia de segurança da obra (Bureau of Reclamation, 1965):

- O vertedouro deve ser dimensionado de modo a evitar o transbordamento do maciço;
- Os taludes devem ter segurança durante a construção e em condições de operação do reservatório, incluindo o problema de rebaixamento rápido;
- A barragem deve ser projetada no sentido de não oferecer tensões excessivas à fundação;
- Os taludes devem ser protegidos contra a erosão causada pela ação de ondas formadas no lago (talude de montante) e ação da chuva (talude de jusante)
- A percolação através do maciço, fundação e ombreiras deve ser controlada para que não ocorram problemas de erosão interna.

Nas barragens assentes em fundação permeável, o fluxo pela fundação constitui-se em importante problema a ser analisado. A percolação não controlada, pela fundação, pode danificar a obra. Problemas de erosão interna ("piping" ou entubamento) podem ocorrer comprometendo a segurança da barragem. Rupturas verdadeiramente catastróficas são devidas a "piping" por erosão interna já que as mesmas ocorrem bruscamente, muitas vezes após vários anos de entrada em operação do reservatório (Terzaghi e Peck, 1967). A necessidade de construção de barragens sobre os mais diversos locais deu origem a vários dispositivos de controle de percolação pela fundação. Estes dispositivos são classificados em três tipos: de interceptação total, de interceptação parcial (que inclui o tapete a montante) e

elementos drenantes. Estes dispositivos podem ser associados em diversas combinações. Turnbull e Mansur (1959), descrevem três métodos de controle de percolação que frequentemente são utilizados juntos: tapete impermeável a montante, berma a jusante (de permeabilidade alta ou baixa) e poços de alívio.

A princípio, deve-se ter em mente que a percolação em uma barragem depende de alguns fatores (Bowles, 1984) e que o dimensionamento dos dispositivos de controle de percolação serão função destes fatores:

- coeficiente de permeabilidade da fundação;
- carga hidráulica disponível no reservatório;
- comprimento de percolação abaixo da barragem;
- área transversal de fluxo.

II.1 - DISPOSITIVOS DE INTERCEPTAÇÃO TOTAL DA PERCOLAÇÃO

Com os dispositivos de interceptação total procura-se evitar de forma total ou quase total a passagem da água pela fundação. Os dispositivos mais comuns são descritos a seguir.

TRINCHEIRA DE SOLO COMPACTADO ("CUT-OFF")

Uma trincheira é escavada com a retirada do material permeável e preenchida com solo compactado (solo utilizado na zona impermeável do maciço). A escavação deve ser feita até o encontro de uma camada subjacente impermeável, que pode ser rocha ou estrato de menor permeabilidade (Figura II.1). A baixa permeabilidade do "cut-off" produz acentuada queda de potencial no fluxo causando a diminuição da vazão através da fundação e da redução das forças de percolação.

A permeabilidade do "cut-off" além de depender do tipo de material utilizado, está associada ao padrão de

compactação do solo e ao teor de umidade. Não apresentando imperfeições, o "cut-off" possui reduzida permeabilidade. Neste caso e não havendo possibilidade de fissuramento o sistema de drenagem a jusante poderia tornar-se desnecessário (Cedergreen, 1967). No entanto materiais de maior permeabilidade são utilizados a jusante das barragens para promover segurança contra possíveis imperfeições da obra. Estas zonas de maior permeabilidade funcionam como elementos drenantes. A ocorrência de fissuras longitudinais pode ser resultante da diferença de compressibilidade do solo de fundação e o solo compactado.

O "cut-off" de solo compactado é uma solução de baixo custo até profundidades de 25.0m e quando não se faz necessário um rebaixamento expressivo do lençol freático (Sherard et al, 1963). Ainda mais, a trincheira de solo compactado é o único tipo de dispositivo de controle de percolação pela fundação em cuja eficiência pode ser controlada pelo exame visual durante a abertura da cava (Terzaghi e Peck, 1967). Confirmando esta afirmação, tem-se a experiência obtida na Barragem de Três Marias (Arêas, 1961). O tratamento da ombreira direita foi feita com trincheira de solo compactado e constatou-se com o andamento das escavações que a alternativa era mais adequada do que a cortina de concreto, cuja eficiência seria prejudicada pelo estado altamente fraturado da rocha subjacente.

Um exemplo interessante é o da Barragem do Açú (Carvalho et al, 1981), construída sobre um espesso manto aluvionar. A barragem fica localizada em uma região bastante carente de recursos hídricos e por esta razão não se deveria admitir grandes perdas por percolação. Além disso a ocorrência de camadas de areia fofa obrigou a que as alternativas de projeto se restringissem a dispositivos de alta estanqueidade e estrutura não rígida. Foram estudadas quatro alternativas de projeto: Injeções de calda de cimento, trincheira de lama, diafragma plástico e "cut-off" de solo compactado. Como o aluvião era bastante

heterogêneo e de alta permeabilidade sendo também de grande espessura (mais de 20.0m), os estudos realizados concluíram que a melhor alternativa seria uma trincheira de solo compactado. A cava foi preenchida com uma cortina de solo de baixa permeabilidade e o restante da trincheira com o próprio material extraído das escavações (Figura II.2).

O "cut-off" deve ser localizado a montante do eixo da barragem, com o objetivo de reduzir as pressões neutras na cunha de fator de segurança mínimo do talude de jusante. No entanto não deve ser além de um ponto para o qual o material impermeável do maciço a jusante do "cut-off" crie condições de aumento de vazão pelo crescimento de gradientes hidráulicos (Figura II.3).

Para se determinar a largura do "cut-off" tem-se a seguinte fórmula prática (Bureau of Reclamation, 1965):

$$W = h - d$$

W - largura do fundo da trincheira;

h - carga hidráulica disponível;

d - Profundidade atingida pelo "cut-off".

É exigida uma largura mínima de 6.0m para o fundo da trincheira, de modo a facilitar a operação de equipamentos no fundo da cava. Outra maneira de se determinar a largura do "cut-off", utilizada na região Nordeste, é a seguinte: a largura superior da trincheira é igual a 2/3 do comprimento que vai do eixo da seção até o pé de montante da barragem.

O cálculo da vazão pela fundação em uma barragem com "cut-off" de solo compactado pode ser obtido pela proposição de Ambraseys (citado por Marsal e Resendiz, 1971).

$$\frac{Q_o}{K_o H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{K_o}{K} - 1\right) \left(\frac{E}{D}\right)}$$

Onde:

- Q_o - Vazão percolante pela fundação;
- K_o e K - permeabilidade do "cut-off" e da fundação;
- B - caminhamento total d'água;
- D - espessura da fundação;
- H - carga hidráulica disponível;
- E - espessura do "cut-off".

TRINCHEIRA DE LAMA ("SLURRY TRENCH")

A trincheira de lama é um elemento não rígido e estanque, resultante do preenchimento de uma vala de pequena largura e paredes verticais por material impermeável. É feita uma escavação de largura variável de 0.60m a 1.80m utilizando-se uma draga ("drag-line"). As paredes da escavação são mantidas estáveis pelo preenchimento contínuo da vala com lama estabilizadora constituída de betonita diluída na água (Figura II.4). A lama forma uma película impermeável que recobre as paredes da cava garantindo sua estabilidade. Após a escavação é feita uma limpeza com sistema tipo "air-lift". O preenchimento é feito de pequena altura para evitar segregação, e é geralmente composto de uma mistura de areia, pedregulho e argila ou betonita, obtendo-se um composto de baixa compressibilidade, embora possa ser mais compressível do que o material escavado. O preenchimento pode também ser feito com cimento e betonita.

A trincheira de lama é utilizada em locais onde o nível do lençol freático está próximo da superfície, podendo ser usada até profundidades de aproximadamente 25.0m (Sherard et al, 1963). Para solos de fundações compressíveis esta alternativa tem aspecto bastante positivo, já que seu comportamento plástico lhe permite acompanhar, sem rupturas, os recalques do solo de fundação.

Poderá ter fator negativo a ocorrência de camadas de pedregulho na fundação, que podem provocar perdas

substanciais de lama betonítica. Há dificuldade de se executar escavações profundas com a "drag-line" como também podem ocorrer dificuldades de engastamento da trincheira no embasamento rochoso.

Em 1958 a trincheira de lama foi utilizada pela primeira vez em fundação de barragem. A Barragem de Wanapum (Sherard et al, 1963) está assente sobre fundação constituída de areia e pedregulho. Os estudos realizados indicaram que o "slurry trench" seria a solução mais favorável.

Na Barragem de Las Tórtolas (Gamboa et al, 1970), foi construída uma trincheira de lama betonítica, penetrando parcialmente na camada de um aluvião de 140.0m de profundidade. O aluvião era bastante heterogêneo e a pouca profundidade apresentava-se mais permeável, necessitando de tratamento. O "slurry trench" em Las Tórtolas penetrou na camada mais permeável até aproximadamente 20.0m.

Pode-se através do método de Brouwer e Rice (Bhatia e El-Din, 1989) fazer medidas "in situ" de permeabilidade da trincheira de lama. Assim sendo, é possível determinar a eficiência desse dispositivo através de ensaios antes e após a construção. O cálculo da vazão também pode ser obtido pela fórmula de Ambraseys (citado por Marsal e Resendiz, 1971) para trincheira de solo compactado.

DIAFRAGMA DE CONCRETO

O diafragma de concreto pode ser constituído por estacas ou painéis (Figura II.5). É usado lama betonítica para estabilização das paredes das escavações. No primeiro caso, as estacas de concreto são executadas (moldadas "in situ") em etapas intercaladas, e podem alcançar até aproximadamente 100.0m (Marsal e Resendiz, 1971). Para o caso de painéis usa-se um tubo de aço para formar uma boa

superfície de ligação entre os painéis e facilitar a escavação do terreno nos extremos.

Quando bem executado, o diafragma de concreto apresenta boa estanqueidade. Como se trata de um elemento rígido a sua posição em relação a barragem deve ser escolhida de tal maneira que ele não venha a sofrer ruptura. Os deslocamentos horizontais podem acarretar flexões indesejadas no diafragma e por esta razão pode ser escolhida a posição do diafragma no eixo da barragem, de modo que os deslocamentos horizontais sejam os admissíveis. No entanto, deslocamentos verticais (recalques) poderão deslocar por atrito negativo o diafragma podendo até rompê-lo.

Na Barragem de Maniconagon 3 (Dreville et al, 1970) foi construído um diafragma duplo de concreto com 60.0cm de diâmetro de estacas ancoradas na rocha. Tendo a fundação uma formação heterogênea granular de 105.0m, a ocorrência de possível fissuramento do diafragma provocado pelo atrito entre o solo e as estacas de concreto, foi examinado realizando-se ensaios com três estacas a uma profundidade de 120.0m, para permitir uma estimativa do desenvolvimento do atrito mesmo com a presença da película de betonita.

A preocupação dos projetistas da Barragem de Maniconagon 3 é comum a todos os projetos de diafragma de concreto. Existe uma relação entre a espessura do diafragma e a profundidade atingida. O projeto deve ser feito com o cuidado para que a estanqueidade não seja afetada.

Ambraseys (citado por Marsal e Resendiz, 1971) propõe também para diafragma de concreto, fórmula para o cálculo de vazão pela fundação.

$$\frac{Q_o}{K_o H} = \frac{1}{0.88 + \frac{B}{D} + \left(\frac{D}{W} - 1 \right) \frac{E}{D}}$$

Sendo:

W - área total de defeitos no dispositivo p/ metro longitudinal;

Os demais símbolos são os mesmos utilizados para o "cut-off".

DIAFRAGMA PLÁSTICO

O diafragma plástico é construído com a escavação da camada permeável com o auxílio de lama betonítica ou argilosa, e o preenchimento com argamassa plástica de solo cimento.

O diafragma deve funcionar como uma unidade íntegra suportando o efeito das solicitações decorrentes do funcionamento da obra. O material de preenchimento deve ter, obviamente, menor permeabilidade do que o solo de fundação e deve ter resistência ao cisalhamento superior.

O diafragma é construído em painéis intercalados, construindo-se os painéis primários e logo após os secundários (ou intermediários). O equipamento utilizado na escavação compõe-se de uma escavadeira comum tipo "clamshell" e um guincho.

As desvantagens desse tipo de dispositivo é semelhante ao "slurry trench", no que tange a lama e a limitação do equipamento. Na Barragem de Joanes (Carvalho et al, 1976), um diafragma plástico foi construído, interceptando a camada superficial mais permeável. Da mesma forma da trincheira de lama, o cálculo da vazão também pode ser obtido com a fórmula de Ambraseys para "cut-off" de solo compactado.

CORTINA DE ESTACAS PRANCHA

Crava-se uma série de estacas na fundação permeável

até o encontro de substrato impermeável (Figura II.6). A cortina de estacas prancha pode estar associada a um "cut-off" parcial de solo compactado. O tipo de estaca está ligado ao tipo de fundação, no entanto estacas de aço são as mais usadas por serem mais resistentes. Em fundações onde existam abundância de blocos de pedras ou matacões, a cravação das estacas pode se tornar bastante difícil e acarretar imperfeições nas ligações, ocorrendo perda substancial de eficiência da cortina. Pode ocorrer também durante a cravação ruptura nas estacas (Sherard et al, 1963).

A barreira criada pela cortina de estacas prancha poderá ser mais ou menos eficiente, dependendo das aberturas nas ligações. A cortina pode ser considerada equivalente a uma camada de solo que será atravessada pelo fluxo, e a dimensão dessa camada equivalente depende das aberturas entre as estacas e pode, portanto, ser comparada à eficiência da cortina com um tapete a montante (Jaspar e Ringhein, 1953). Na Barragem de Swift Creek (Burke, citado por Sherard et al, 1963), os vazios entre as estacas foram preenchidos com concreto, objetivando aumentar a eficiência da cortina. Ainda as aberturas entre as estacas podem ser diminuídas com a ocorrência de corrosão do metal ou preenchimento dos vazios por finos do solo de fundação, colmatando a cortina. A presença de tensões exercidas sobre as estacas podem também provocar o fechamento nas aberturas das ligações (Bennett, citado por Sherard et al, 1963).

A cortina de estacas prancha foi muito utilizada no passado em alguns países, sendo atualmente pouco utilizada em fundações permeáveis de barragens. No projeto de cortina de estacas prancha deve ser escolhido o tipo de estaca (geralmente de aço) e o seu perfil. A localização da estaca a jusante tem melhor eficiência na redução dos gradientes de saída (Casagrande, 1935). O projeto deve ser limitado a fundações de silte, areia e pedregulho fino. O cálculo da vazão na fundação com cortinas de estacas prancha pode ser obtido com a mesma fórmula de Ambraseys para o diafragma de

concreto.

CORTINA DE INJEÇÕES

Consiste da injeção de materiais como cimento, argila, betonita ou substâncias químicas na fundação aluvionar permeável, com objetivo de reduzir a permeabilidade do aluvião. Não deve ser confundido com a injeção de cimento em maciços rochosos fraturados que vem sendo usada durante muitos anos com muito sucesso, sendo sua eficiência analisada por diversos autores, como pode ser visto na "First Rankine Lecture" (Casagrande, 1961). A injeção em depósito aluvionar de areia e pedregulho foi iniciada com sucesso por engenheiros franceses. A injeção de cimento pode ser obtida através de dois métodos atualmente usuais: injeção com tubo de base aberta e injeção do tipo CCP. No processo de injeção faz-se primeiramente a abertura de furos, depois preparação da calda a ser injetada e finalmente o bombeamento.

A injeção de cimento não deve ser feita em solos com muitos finos, pois estes dificultam a penetração das partículas de cimento nos vazios do solo. No caso de injeções de argila, deve-se ter em mente a probabilidade de ocorrência de arraste das partículas pelas forças de percolação. Para as injeções de substâncias químicas, tem-se a facilidade da viscosidade da solução ser a mesma da água, no entanto são as injeções de maior custo. A eficiência da cortina de injeções pode ser verificada através da posição da linha superior de percolação como se pode ver na Figura II.7.

A Barragem de Serre-Poçon (Sherard et al, 1963) está assente sobre um manto aluvionar de aproximadamente 90.0m e foi utilizado no tratamento da fundação uma cortina de injeções de cimento. A técnica de injeção em aluvião de areia e pedregulho foi inicialmente utilizada nessa barragem. No caso da ensecadeira da Hidroelétrica Outards-4

(Brown e Conean, 1970), a cortina de injeções de cimento e argila foi a solução adotada, pois uma cortina de estacas prancha seria inviável pela presença de muitas pedras, e no caso de diafragma de concreto ter-se-ia uma excessiva perda de betonita. A Barragem de Massingir (Serafim e Carvalho, 1970) está assente sobre um aluvião bastante permeável. Injeção de cimento e argila com 8 a 10% de cimento foi feita como teste para tratamento da fundação. Logo após a injeção da calda foi feito um ensaio de bombeamento e verificou-se inalterada a permeabilidade da fundação. Injeção no tipo de solo da fundação da Barragem de Massingir provoca a formação de lentes em camadas horizontais ocorrendo dilatação da superfície do solo sem materialmente alterar a permeabilidade média da fundação.

O projeto de barragens sobre aluviões permeáveis com utilização de cortina de injeções é feito verificando-se as limitações quanto ao tipo de solo e realizando-se misturas de calda como teste para obtenção da melhor mistura a injetar. Executando-se ensaios "in situ" em injeções testes pode-se obter a redução de permeabilidade da região injetada correspondente a eficiência que se deseja. Pode-se, juntamente com a cortina de injeções, utilizar sistema drenante a jusante, garantindo a obra contra eventuais erosões internas e subpressões.

A vazão através da fundação pode ser calculada com a mesma fórmula proposta por Ambraseys para "cut-off" de solo compactado.

II.2 - DISPOSITIVOS DE INTERCEPTAÇÃO PARCIAL DA PERCOLAÇÃO

Quando a espessura do manto aluvionar permeável é muito grande ou quando a permeabilidade da fundação é decrescente com a profundidade, dispositivos de controle de percolação são utilizados com penetração parcial (Figura II.8).

TRINCHEIRA DE SOLO COMPACTADO

Os dispositivos de penetração parcial, quando utilizados em fundação homogênea, apresentam baixa eficiência, pois a redução da percolação não é proporcional à redução da área permeável da fundação. Estudos realizados por Turnbull e Creager (citados pelo Bureau of Reclamation, 1965) em fundações homogêneas e isotrópicas indicaram que com 50% de penetração tem-se uma redução de apenas 25% das descargas freáticas e com 80% de penetração, obtem-se 50% de redução de vazão. Cedergreen (1967), através da técnica de redes de fluxo, obteve valores semelhantes aos anteriores. Amorim (1976), com a aplicação do Método dos Elementos Finitos, confirmou também a baixa eficiência do "cut-off" parcial.

O dispositivo de interceptação parcial pode ser utilizado em conjunto com outros, como por exemplo: tapete impermeabilizante a montante com "cut-off" parcial de solo compactado e sistema drenante a jusante. A opção pelo dispositivo de interceptação parcial é sugerida principalmente quando não se tem a permeabilidade horizontal muito maior do que a vertical, pois neste caso a eficiência cairia mais ainda.

A Barragem do Carão (DNOCS, 1982), possui um "cut-off" parcial de solo compactado associado a um tapete impermeabilizante a montante.

TAPETE IMPERMEABILIZANTE A MONTANTE

Um tapete horizontal impermeável a montante aumenta o comprimento de caminhamento d'água através da fundação permeável, diminuindo a vazão, as forças de percolação e consequentemente os gradientes de saída (Figura II.9).

Geralmente em conjunto com elementos drenantes, o tapete é utilizado quando se tem uma camada permeável

bastante espessa, podendo ter maior eficiência do que um "cut-off" parcial em se tratando de fundação homogênea. Como se pode ver na Tabela II.1, é uma das obras de controle de percolação de menor custo (Marsal e Resendiz, 1971). Para regiões onde houver ocorrência de sismos, o tapete é uma solução de bastante segurança, pois evita-se ter na fundação materiais de rigidez diferente.

A segurança pode ser ainda maior com a ocorrência de processos de sedimentação no reservatório que aumenta a eficiência com o decorrer do tempo de operação da barragem. O tapete pode ser usado em barragens de grande porte e com espessa camada aluvionar. Em algumas situações o material usado no tapete, seria destinado à botafora, concorrendo ainda mais para a redução dos custos (Amorim, 1976).

TIPO	ITEM	UN	PREÇO
Tapete	Limpeza e nivelamento	m ²	0.15-0.25
	Solo compactado em camadas	m ³	1.50-2.50
Trincheira de solo compactado	Escavação abaixo da água	m ³	1.00-2.00
	Solo compactado em camadas	m ³	1.50-2.50
Trincheira de Lama	Escavação e reaterro com lama betonítica	m ³	70.0-80.0
Cortina de Injeções	Perfuração e injeção em depósito aluvionar	m ²	100-120
Diafrag.de Concreto (estacas)	Perfur. e colocação de concreto	m ²	80-90
	Perfuração e explosivos	m ²	10-20
Diafrag.de Concreto (painéis)	Escavação e colocação de concreto	m ²	70-80

TabelaII.1 Custo de dispositivos de controle de percolação do México (Em dólares) - Apud Marsal e Resendiz, 1971

A minimização dos custos em barragens, no entanto, não deve por em risco a segurança da obra. Em barragens onde o nível do reservatório varie bastante, a superfície

do tapete pode ficar exposta ao sol por um período suficiente para que ocorra retração da argila, fissurando o tapete. Pequenas falhas do tapete podem resultar em grande perda de eficiência (Cedergreen, 1967). Em fundações estratificadas, com permeabilidade horizontal bem maior do que a vertical, a eficiência do tapete pode cair bastante ao ponto de inviabilizar a escolha desta solução. Deve-se tomar cuidado com o terreno onde será assentado o tapete. Caso seja necessário, pode-se utilizar uma transição entre o tapete e a fundação. Com o enchimento do reservatório, poderão ocorrer recalques diferenciais na fundação e poderão surgir, em consequência, fissuras no tapete.

A literatura técnica contém vários exemplos de aplicação do tapete, que serão a seguir comentados. Na Barragem de Abelardo L. Rodriguez (Marsal e Resendiz, 1971), um tapete impermeável a montante em conjunto com um "cut-off" de solo compactado foi utilizado como tratamento da fundação permeável. A permeabilidade média do aluvião é da ordem de $k = 1.6 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$. O tapete tem um comprimento de 300.0m e caminhamento d'água total de 460.0m. A vazão teórica sem o tapete seria de $3.71 \text{ m}^3/\text{s}$ e com o tapete a vazão cairia para $1.54 \text{ m}^3/\text{s}$, dando uma eficiência de 58%. Na realidade, conforme observação de instrumentação, a eficiência foi de 51%. Portanto a vazão calculada ficou próxima da vazão de projeto. A Barragem de Asswan (Hammad, 1963), construída sobre uma camada permeável bastante espessa, tem um tapete de 630.0m de comprimento em conjunto com aplicação de injeção de cimento, reduzindo a permeabilidade do aluvião na região de injeção. Foi também instalada uma série de poços de alívio como sistema drenante. A Barragem de Massingir (Serafim e Carvalho, 1970) está assente sobre um aluvião bastante permeável. Foi utilizado como redutor de percolação pela fundação um tapete impermeável a montante. Esta solução adotada foi a melhor opção para a região, levando-se em conta a ocorrência bastante comum de sismos.

Na Barragem de Tarbela (Khan e Alinaqui, 1970),

foram estudados sete dispositivos redutores da percolação pelo aluvião com 60.0 a 120.0m de espessura: diafragma de estacas de concreto, cortina de injeções de cimento, argila e substâncias químicas, "slurry trench", combinação de pequeno tapete com um "cut-off", injeção de silte de 450.0m a 600.0m de extensão sob a barragem e um tapete impermeável a montante de 1432.0m. Concluídos os estudos, verificou-se que o tapete seria a solução de menor custo e envolveria os menores problemas de construção. A sedimentação também contribuiria para melhorar a eficiência do tapete. Durante o primeiro enchimento parcial da barragem, em 1974, observou-se a formação de fissuras no tapete, e em consequência sumidouros ("sinkholes"), resultantes do recalque diferencial da fundação, com o carregamento hidráulico. A percolação aumentou temporariamente, até que essas fissuras foram recuperadas e a barragem passou a funcionar sem problemas (Wilson e Marsal, 1979).

A utilização de um tapete auxiliar, a montante do tapete principal foi feito na Barragem de Altinapa (Ural et al, 1967). O tapete auxiliar tinha como função, melhorar o combate à percolação excessiva. Para efeito de cálculos, foi desprezada a sua existência. O tapete auxiliar seria uma espécie de fator de segurança. Um caso de barragem brasileira que utilizou como dispositivo de controle de percolação o tapete, é o da Barragem de Curuá-Una (Ferrari, 1973), que teve o seu dimensionamento obtido com a formulação de Bennett, no que diz respeito a comprimento efetivo.

O dimensionamento do tapete consiste em se determinar o comprimento necessário a se obter a vazão admissível pela fundação e a segurança quanto ao carreamento das partículas de solo e consequente formação de "piping". A vazão de percolação pode ser calculada através de vários métodos, como por exemplo, a técnica de desenho de redes de fluxo, entre outros. Uma barragem de terra pode ter seção mista com várias zonas de diferentes materiais, geralmente anisotrópicos. A fundação pode ser

formada também por uma grande variedade de solos. São estes motivos que tornam difícil o desenho de redes de fluxo para o dimensionamento de tapetes. Assim, através de simplificações foram desenvolvidos outros métodos de dimensionamento que serão descritos no capítulo IV.

Uma camada natural de baixa permeabilidade na superfície do terreno pode funcionar como um tapete impermeabilizante. Neste caso deve ser examinada a necessidade de correção de eventuais falhas na continuidade da camada. Ou mesmo, da necessidade de se complementar a camada com a superposição de um tapete, que obviamente será de espessura reduzida. Outro aspecto a analisar é a necessidade de poços de alívio a jusante quando o peso desta camada de solo impermeável for inferior a pressão da água abaixo da camada.

II.3 - ELEMENTOS DRENANTES

Os elementos drenantes, descritos a seguir, têm o objetivo de prevenir o "piping" através da fundação. Como drenos deverão permitir a passagem da água com reduzidas perdas de carga (Cedergreen, 1972).

DRENO DE PÉ E VALAS DRENANTES

Os drenos de pé são utilizados frequentemente associados a tapetes drenantes e filtrantes, coletando as águas desde as ombreiras até a calha do rio barrado. O dreno de pé deve ficar envolto de uma vala drenante a jusante da barragem, devendo obedecer a critérios de filtro, como por exemplo, os de Bertram e Terzaghi. Quando ocorrer uma camada de menor permeabilidade na superfície do aluvião, a vala drenante deve ser escavada até o encontro do estrato permeável subjacente. Middlebrooks e Jervis (1947), mostraram que o alívio de pressões para o caso de camada de menor permeabilidade sobrejacente a manto

permeável, é proporcional à penetração do elemento drenante no solo permeável. Por esta razão o dreno de pé e vala drenante tem eficiência limitada na atuação como filtro e dreno (Figura II.10).

TAPETES DRENANTES E FILTRANTES

Os tapetes drenantes e filtrantes são construídos a jusante de barragens assentes sobre fundações permeáveis. São constituídos de materiais de peso e permeabilidade suficientes ao desempenho das funções de filtração e drenagem (Figura II.10).

O tapete drenante deve ter permeabilidade suficiente para não oferecer resistência ao fluxo e peso suficiente para estabilizar as subpressões. Sua espessura pode decrescer à medida que se afasta do pé de jusante da barragem, já que os gradientes de saída diminuem com a distância do pé da barragem. Os critérios de filtração devem ser obedecidos para que não ocorram arrastamento de material da fundação com a conseqüente formação de "piping". O material proveniente do desmonte de rochas (construção do vertedouro por exemplo), tendo a granulometria concordante com os critérios de filtração em relação ao solo aluvionar, pode ser utilizado na construção do tapete. Deve ser tomado cuidado com relação à utilização de material geo-têxtil, pois sendo o aluvião bastante heterogêneo, algumas quantidades de solo fino poderão colmatar o geo-têxtil. Para subpressões elevadas o tapete pode tornar-se ineficiente, podendo ter construção bastante onerosa.

O Bureau of Reclamation (1965), descreve um roteiro de dimensionamento de tapetes drenantes. A espessura inicial, taludamento e comprimento do tapete são obtidos com base na carga hidráulica total e profundidade da fundação.

POÇOS DE ALÍVIO

Quando se tem uma barragem sobre fundação permeável com camada superior de menor permeabilidade e quando não se obtém subpressões a níveis satisfatórios por meio de valas drenantes, o uso de poços de alívio pode ter grande eficiência (Figura II.11). Turnbull e Mansur (1953) apresentaram estudos através de modelos em que se mostra a eficiência dos poços de alívio para diferentes tipos de estratificação do solo de fundação.

A eficiência dos poços de alívio é proporcional à penetração na fundação aluvionar (Middlebrooks e Jervis, 1947). O que se objetiva é a redução das subpressões a níveis satisfatórios entre os poços de alívio. Fumió (1982), analisou através do Método dos Elementos Finitos, efeitos de alívio de pressões com a penetração. Na análise foi admitida a permeabilidade dos poços inferior ao real, pois na simulação se admite apenas análise bidimensional.

Se logo após o projeto e construção de uma série de poços de alívio, for verificado que a redução das pressões entre os poços foi inferior a de projeto, pode-se instalar outra série de poços adicionais. Os poços de alívio são mais eficientes em fundações que apresentam permeabilidade preferencialmente horizontal. Logicamente, em fundações estratificadas, as valas drenantes por não atravessarem os vários estratos, não apresentam a mesma eficiência dos poços de alívio.

Os poços de alívio requerem inspeção e manutenção, podendo ser substituídos durante o tempo de operação da barragem. Também são causadores de aumento de descargas freáticas pela redução do comprimento de percolação.

A utilização dos poços de alívio é intensa em grandes barragens assentes sobre espessa camada permeável. Na Barragem de Asswan (Hammad, 1963), além de tapete impermeabilizante a montante e cortina de injeções, foi

instalada uma série de poços de alívio. E também na Barragem Fort Randall, poços de alívio foram projetados e construídos com várias profundidades (Thorfinnson, 1959).

O dimensionamento inicial de poços de alívio pode ser feito a partir de formulação proposta por Middlebrooks e Jervis (1947). O Bureau of Reclamation (1965) recomenda que a profundidade dos poços seja igual a altura da barragem. Apesar de apresentar-se na Figura II.11 com grandes dimensões, podem ser usados poços menores. No projeto de poços de alívio, deve ser prevista a colocação de filtro para evitar o carreamento de material de fundação.

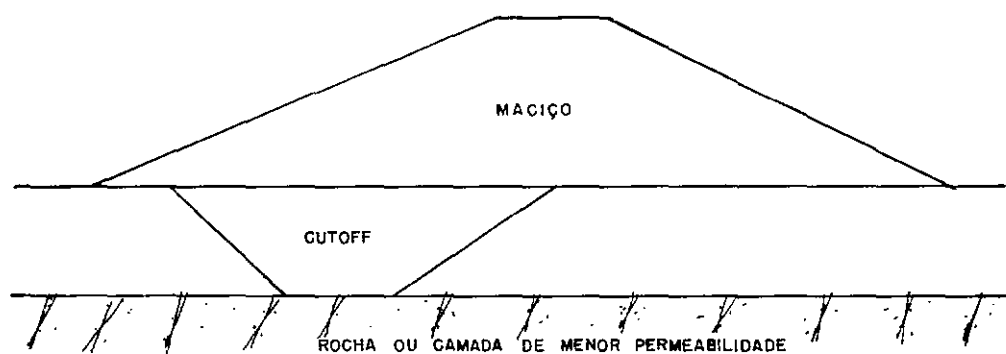


Figura II.1 Trincheira de solo compactado

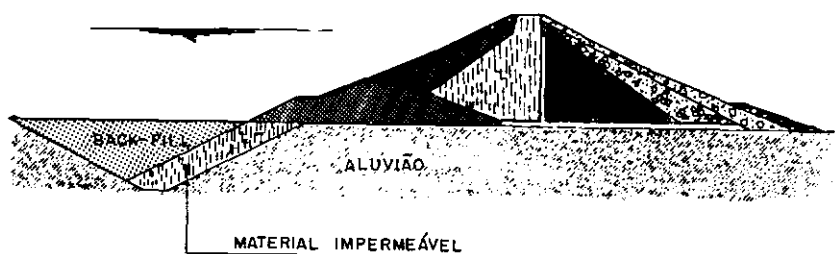
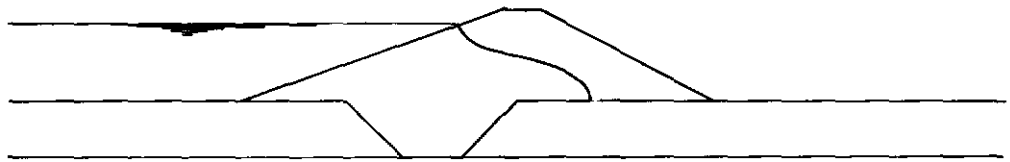
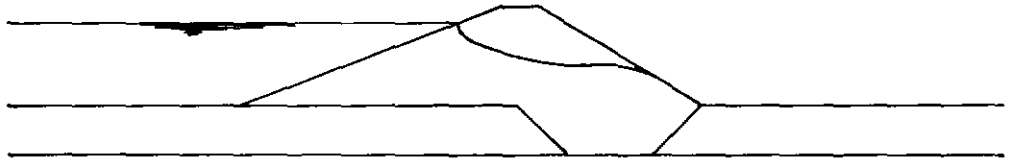


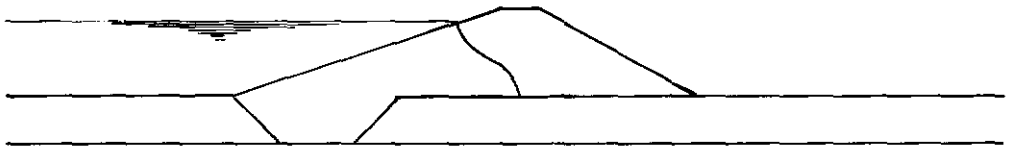
Figura II.2 Barragem Armando Ribeiro Gonçalves (Açu)



a) POSIÇÃO MAIS FAVORÁVEL



b) INSEGURANÇA NO TALUDE DE JUSANTE



c) AUMENTO DE GRADIENTES MAIOR VAZÃO

Figura II.3 Posições de projeto de um "cut-off"

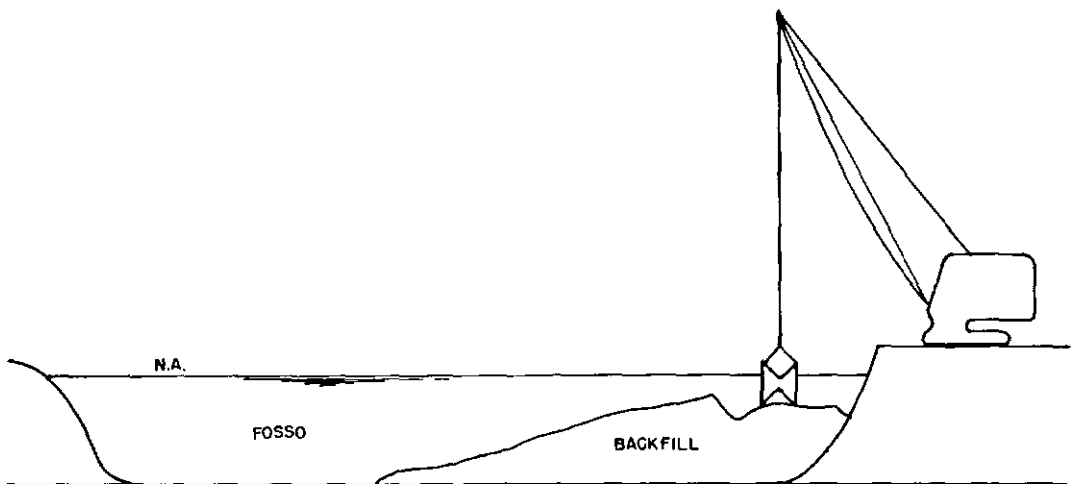


Figura II.4 Trincheira de Lama ("Slurry Trench")

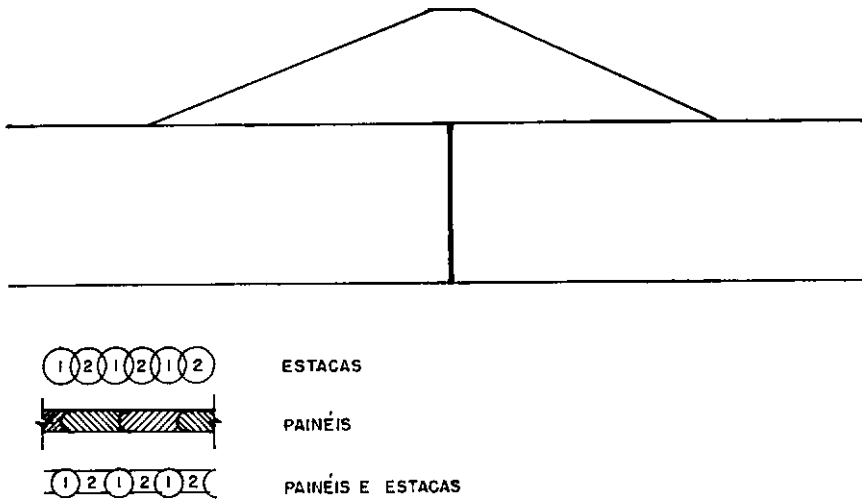


Figura II.5 Diafragma de concreto

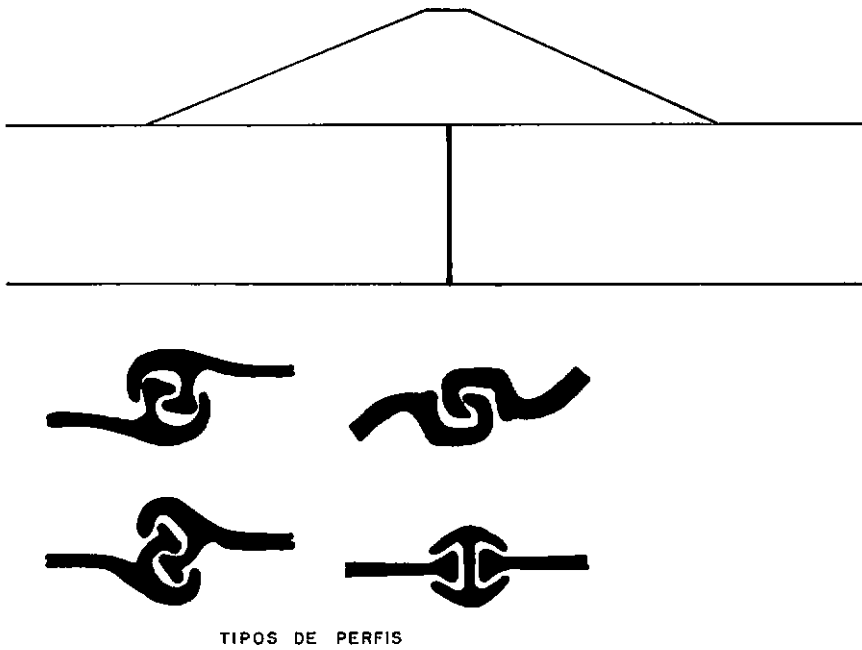


Figura II.6 Cortina de estacas prancha

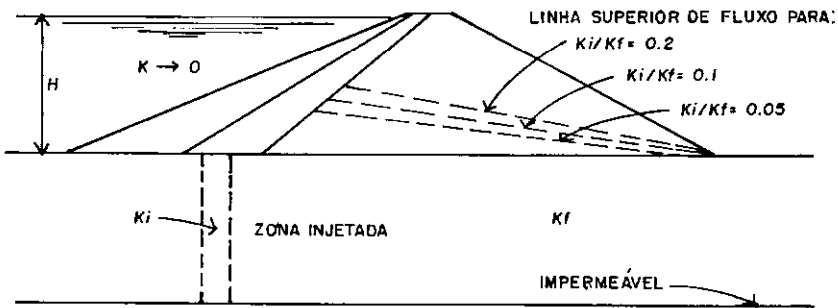


Figura II.7 Eficiência de uma cortina de injeções, verificada pela posição da superfície livre (Apud Cedergreen, 1972)

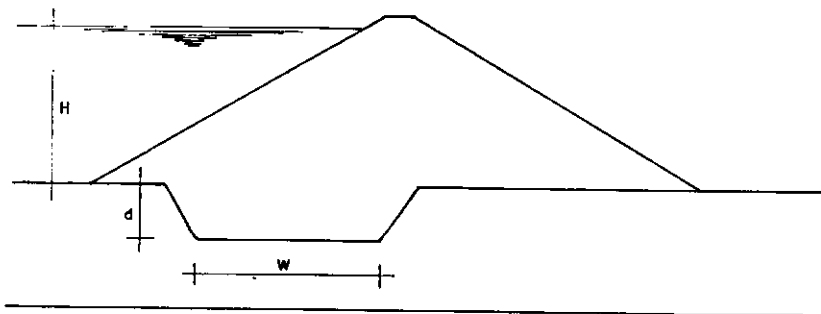


Figura II.8 "Cut-off" de penetração parcial

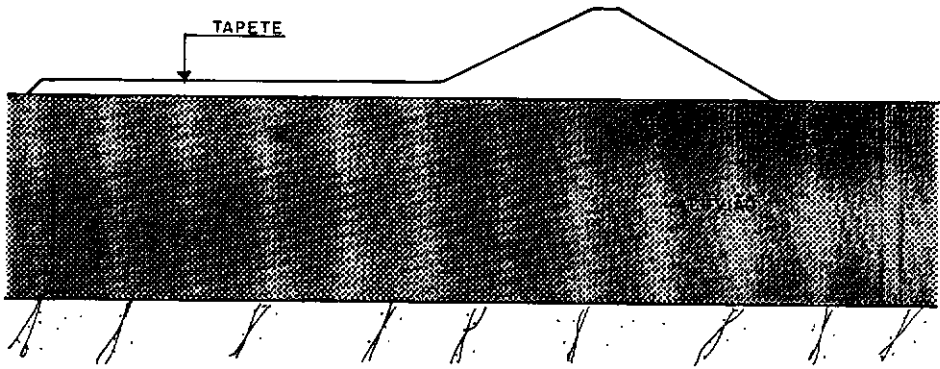


Figura II.9 Tapete impermeabilizante a montante

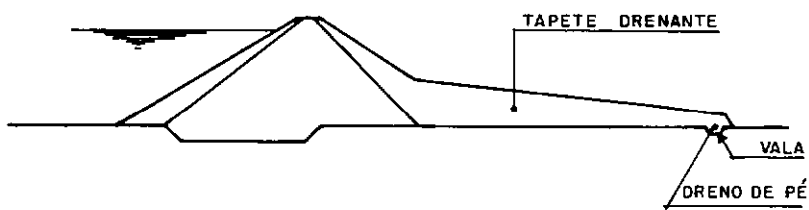


Figura II.10 Dreno de pé, valas e tapetes drenantes

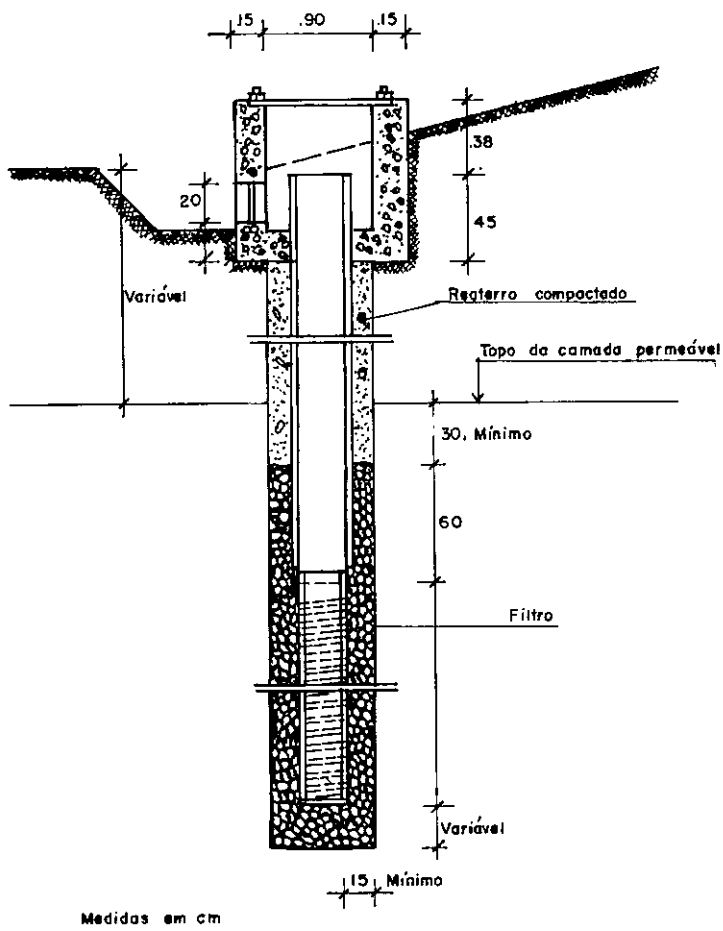


Figura II.11 Poço de Alívio

CAPITULO III

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O Método dos Elementos Finitos que pode ser aplicado a vários problemas de engenharia, teve sua origem voltada para problemas de engenharia estrutural. Atualmente pode ser aplicado a problemas de mecânica dos solos, percolação em meios porosos, transmissão de calor etc. O Método dos Elementos Finitos com seu poder abrangedor pode ser aplicado desde situações simples até as mais complexas, sem implicar em dificuldade adicional.

No Método dos Elementos Finitos, é feita a discretização de um contínuo com infinitos graus de liberdade transformando-o em um sistema equivalente com um número finito de graus de liberdade. A discretização é feita através de elementos geométricos (tais como: triângulos, quadriláteros e hexaedros), conectados por pontos chamados de nós. A função que caracteriza o fenômeno estudado, é interpolada a partir dos nós dos elementos, de modo a ser obtida a solução geral para todo o contínuo.

Em problemas estruturais, todas as cargas externas são assumidas como aplicadas nos nós. A partir daí, tem-se os deslocamentos dos nós da estrutura, obtidos pelo princípio dos trabalhos virtuais ou pelo princípio da energia potencial mínima, entre outros.

Atualmente o MEF tornou-se uma aplicação direta dos princípios variacionais, onde funções são estudadas para caracterizar a variação em cada elemento.

III.1 ENFOQUES MATEMÁTICOS DOS MÉTODOS DISCRETOS

A um fenômeno físico tem-se associada uma equação diferencial. A solução exata desta equação diferencial é o

resultado exato do fenômeno. Utilizando Desai (1979) pode-se supor, por exemplo, um fio esticado firmemente e carregado linearmente (Figura III.1). Seu comportamento em termos de tensões e deformações é regido pela seguinte equação diferencial:

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} + w(x) = 0 \quad , \quad w(x) = \frac{w_0 x}{L}$$

onde: T - tensão no fio;

y - deflexão no fio;

w(x) - carregamento distribuído linearmente ou triangular;

L - comprimento do fio.

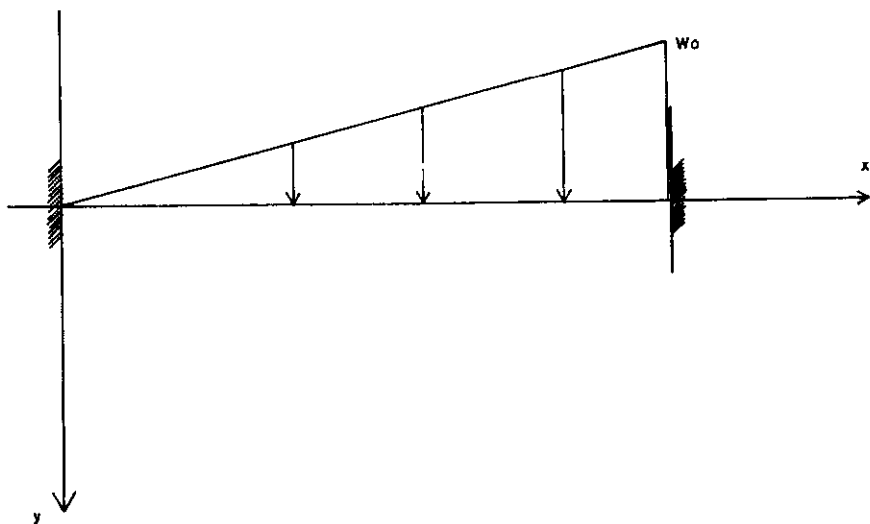


Figura III.1 - Fio esticado com carregamento triangular

A solução exata desta equação diferencial para qualquer ponto no fio é dada pela seguinte equação:

$$y(x) = \frac{w_0}{6TL} [-x^3 + L^2 x]$$

Imaginando que a solução exata não fosse conhecida.

poder-se-ia aproximá-la a uma parábola, embora se saiba que a solução exata é uma equação do terceiro grau:

$$y(x) = Ax (x - L)$$

Ainda a parábola satisfaz as condições de contorno, pois nas extremidades não há deflexão. Assim o residual, ou seja, a diferença entre o valor exato e o calculado, é obtido pela substituição da equação da parábola na equação diferencial:

$$R(x) = 2AT + \frac{w_0 x}{L}$$

Se fosse possível fazer o residual identicamente zero para todo valor de x , obter-se-ia a solução exata do fenómeno.

Existem diferentes maneiras de se resolver este problema, as quais são apresentadas a seguir:

COLOCAÇÃO

Desde que não é possível $R(x) = 0$ para todo x , faz-se para tantos valores quanto possível. No caso do fio, tem-se apenas um parâmetro (A) para ajuste, assim é necessário satisfazer a equação somente em um ponto. Para $x = L/2$, obtém-se:

$$2AT + \frac{w_0}{2} = 0$$

$$A = -\frac{w_0}{4T}$$

Desta maneira a solução aproximada para o fenómeno é a seguinte:

$$y(x) = -\frac{w_0}{4TL} [-x^2L + xL^2]$$

MINIMOS QUADRADOS

O parâmetro A da solução aproximada pode ser determinado da maneira a seguir descrita. Definindo inicialmente a função:

$$I = \int_0^L [R(x)]^2 dx$$

sendo "I" positivo ou zero. Fazendo-se com que "I" seja mínimo, ter-se-á uma solução aproximada do problema. Para tanto, substitue-se R(x) pela expressão que representa o residual e que foi mostrada anteriormente. Deriva-se, então em relação a A:

$$I = \int_0^L [R(x)]^2 dx = \int_0^L \left[2AT + \frac{w_0 x}{L} \right]^2 dx$$

$$\frac{\partial I}{\partial A} = \int_0^L 2 \left[2AT + \frac{w_0 x}{L} \right] [2T] dx = 8AT^2 + 2Tw_0 LT$$

Fazendo $\frac{\partial I}{\partial A} = 0$, obtém-se:

$$A = \frac{-w_0}{4T}$$

METODO DE GALERKIN

Até agora somente foi usado um parâmetro e uma função independente. Em geral haverá uma série de termos da seguinte forma:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n A_i W_i$$

E desta maneira tem-se o residual como função de x e de A_i, ou seja, R(x, A₁, A₂, ..., A_n). O método de Galerkin requer que

a média ponderada deste residual com respeito a cada um dos termos independentes da série seja zero. Assim:

$$\int_0^L W_1 R(x, A_1, A_2, \dots, A_n) dx = 0$$

$$\int_0^L W_2 R(x, A_1, A_2, \dots, A_n) dx = 0$$

$$\text{Até } \int_0^L W_n R(x, A_1, A_2, \dots, A_n) dx$$

São estas as equações independentes para os parâmetros, A_1, A_2, \dots, A_n . Para a aproximação do fio com apenas um parâmetro, tem-se:

$$R(x, A) = 2AT + \left(-\frac{w_0 x}{L} \right)$$

Para a equação: $y(x) = Ax(x - L)$ tem-se:

$$W(x) = x(x - L)$$

E pelo método de Galerkin obtém-se:

$$\int_0^L W(x) R(x) dx = \int_0^L [x^2 - xL] \left[2AT + \frac{w_0 x}{L} \right] dx =$$

$$= \frac{1}{3} AT + \frac{1}{12} w_0 = 0 \Rightarrow A = -\frac{w_0}{4T}$$

MÉTODO DE RITZ

Para certos problemas que descrevem fenômenos físicos, existem funções escalares que atingem valores estacionários quando a solução exata é substituída nestes

problemas. Para o problema do fio esticado, a energia potencial do sistema é esta função escalar:

$$EP = \int_0^L \left[-wy + \frac{1}{2} T \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right] dx$$

O valor estacionário absoluto de EP corresponde ao valor mínimo. Se a solução exata faz EP um mínimo, então pode-se usar EP como medida de aproximação:

$$w(x) = \frac{w_0 x}{L}$$

$$y(x) = Ax (x - L)$$

Por esta razão:

$$EP = \int_0^L \left(-w_0 \left(\frac{x}{L} \right) Ax(x-L) + \frac{1}{2} T (2Ax - AL^2)^2 \right) dx$$

Agora o valor de A para o qual tem-se a EP como valor mínimo, é o seguinte:

$$\frac{\partial EP}{\partial A} = \int_0^L \left(-\frac{w_0}{L} x^2 (x - L) + TA (2x - L)^2 \right) dx = 0$$

$$\frac{\partial EP}{\partial A} = \frac{1}{12} w_0 + \frac{1}{3} TA = 0 \Rightarrow A = \frac{-w_0}{4T}$$

MÉTODO DAS DIFERENÇAS FINITAS

É um método de solução por discretização do contínuo. Deriva-se por diferenças finitas e aplica-se na equação diferencial que governa o fenômeno. Com a discretização forma-se um sistema de equações com "n" equações e "n" incógnitas, onde "n" é o número de divisões

da discretização. A determinação das incógnitas resolve o problema.

Suponha a divisão do fio em três elementos com quatro nós (Figura III.2). Como os nós extremos são indeslocáveis, o sistema será de duas incógnitas correspondente aos nós 2 e 3.

A equação do fio é dada pelo seguinte:

$$T \frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{w_0 x}{L} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{-w_0 x}{LT}$$

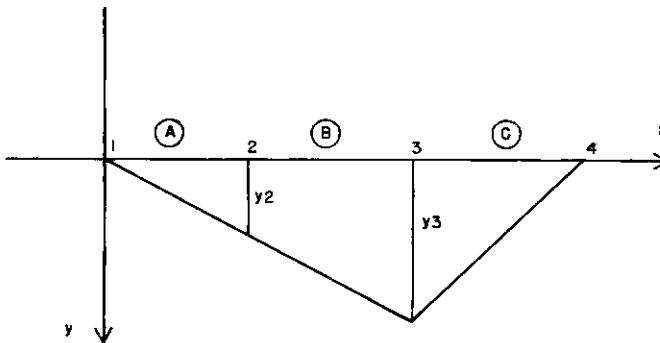


Figura III.2 Discretização do fio

Faz-se portanto:

$$\frac{dy}{dx} \approx \frac{Y_{i+1} - Y_i}{\Delta x} \approx \frac{Y_i - Y_{i-1}}{\Delta x}$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} \approx \frac{Y_{i+1} - 2Y_i + Y_{i-1}}{\Delta x^2}$$

Assim:

$$Y_{i-1} - 2Y_i + Y_{i+1} = \frac{-w_o x \Delta x^2}{LT}$$

Determina-se então o seguinte sistema de equações:

$$- 2Y_2 + Y_3 = \frac{-w_o x_2 \Delta x^2}{LT}$$

$$Y_2 - 2Y_3 = \frac{-w_o x_3 \Delta x^2}{LT}$$

$$Y_2 = \frac{4w_o L^2}{81T} ;$$

$$Y_3 = \frac{5w_o L^2}{81T}$$

APROXIMAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS

A solução aproximada pelo Método dos Elementos Finitos pode ser mais refinada ou não, dependendo da intensidade de ocorrência do fenômeno em determinada parte do corpo. Quanto mais refinado (maior discretização) melhor será a aproximação.

Como os nós extremos são indeslocáveis a energia potencial é função dos deslocamentos nos nós 2 e 3 (Figura III.2).

$$EP = EP (y_2, y_3)$$

Os elementos são assumidos do mesmo tamanho, e a energia potencial produzida pelos elementos A, B e C deverão ser minimizadas pelos deslocamentos y_2 e y_3 .

Para o elemento A:

$$Y_A = \frac{3}{L} X Y_2 ;$$

$$\frac{dy}{dx} = \frac{3}{L} Y_2$$

$$E_{PA} = - \int_0^{L/3} \left[w_0 \left(\frac{x}{L} \right) \right] \left[\frac{3}{L} (x) Y_2 \right] dx + \\ + \int_0^{L/3} \frac{1}{2} T \left[\left(\frac{3}{L} \right) Y_2 \right]^2 dx$$

$$E_{PA} = - w_0 \frac{L}{27} Y_2 + \frac{3}{L} T \frac{1}{L} Y_2^2$$

Para o elemento B:

$$Y_B = \left(2Y_2 - Y_3 \right) + \left(-\left(\frac{3}{L} \right) Y_2 + \left(\frac{3}{L} \right) Y_3 \right) x$$

$$E_{PB} = - \int_{L/3}^{2L/3} w_0 \left(\frac{x}{L} \right) \left[\left(2Y_2 - Y_3 \right) + \left(-\frac{3}{L} Y_2 + \frac{3}{L} Y_3 \right) x \right] dx + \\ + \int_{L/3}^{2L/3} \frac{1}{2} T \left[-\frac{3}{L} Y_2 + \frac{3}{L} Y_3 \right]^2 dx$$

$$E_{PB} = - w_0 L \left[\frac{1}{6} \left(2Y_2 - Y_3 \right) + \frac{7}{27} \left(-Y_2 + Y_3 \right) \right] + \\ + \frac{TL}{6} \left[-\frac{3}{L} Y_2 + \frac{3}{L} Y_3 \right]^2$$

Para o elemento C :

$$Y_C = 3Y_3 - \frac{3}{L} Y_3 x$$

$$E_{PC} = - w_0 L Y_3 \left(\frac{7}{54} \right) + \left(\frac{3}{2} \right) \frac{T}{L} Y_3^2$$

A energia total será :

$$EP = E_{PA} + E_{PB} + E_{PC}$$

$$EP = \frac{1}{9} w_0 L Y_2 - \frac{2}{9} w_0 L Y_3 + 3 \frac{T}{L} Y_2^2 - 3 \frac{T}{L} Y_2 Y_3 +$$

$$+ 3 \frac{T}{L} Y_3^2$$

Para a minimização da energia em relação aos deslocamentos Y_2 , Y_3 , tem-se:

$$\frac{\partial EP}{\partial Y_2} = 0 \quad e \quad \frac{\partial EP}{\partial Y_3} = 0$$

A variação da energia potencial devida a variação dos deslocamentos é dado por:

$$\delta EP = \frac{\partial EP}{\partial Y_2} \delta Y_2 + \frac{\partial EP}{\partial Y_3} \delta Y_3$$

$$\delta EP = - \frac{1}{9} w_0 L \delta Y_2 - \frac{2}{9} w_0 L \delta Y_3 + \frac{6T}{L} Y_2 \delta Y_2 -$$

$$- 3 \frac{T}{L} Y_3 \delta Y_2 - 3 \frac{T}{L} Y_2 \delta Y_3 + 6 \frac{T}{L} Y_3 \delta Y_3$$

Se EP tem um valor estacionário, então δEP deverá ser igual a zero para todos os valores de δY_2 e δY_3 . Portanto:

$$- \frac{1}{9} w_0 L + 6 \frac{T}{L} Y_2 - 3 \frac{T}{L} Y_3 = 0$$

$$- \frac{2}{9} w_0 L - 3 \frac{T}{L} Y_2 + 6 \frac{T}{L} Y_3 = 0$$

Em notação matricial, tem-se:

$$\begin{bmatrix} 6\frac{T}{L} & -3\frac{T}{L} \\ -3\frac{T}{L} & 6\frac{T}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Y_2 \\ Y_3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{w_0 L}{9} \\ \frac{2w_0 L}{9} \end{Bmatrix}$$

E a solução é:

$$Y_2 = \frac{4}{81} \frac{w_0 L^2}{T} \quad ; \quad Y_3 = \frac{5}{81} \frac{w_0 L^2}{T}$$

Para certos fenômenos, a obtenção do resultado exato pode ser fácil, no entanto para casos como fluxo em meios porosos pode ser impossível de obtê-lo. Por esta razão a solução pode ser obtida através de aproximação. Para soluções impossíveis de obtenção da solução exata, a aproximação pelos elementos finitos, é feita com a formulação de um funcional (função da função do fenômeno) que pode ser a energia potencial.

III.2 APLICAÇÃO DO MEF A PERCOLAÇÃO

É impossível se obter a solução exata da equação de Laplace que governa o fluxo de água em meios porosos na maioria dos casos práticos. Por esta razão adotam-se soluções aproximadas em problemas de percolação. O método gráfico (redes de fluxo) é uma destas soluções aproximadas de largo uso na engenharia, embora em algumas situações possa se tornar de difícil resolução. O Método dos Elementos Finitos pode ser aplicado a problemas de percolação como solução aproximada, sendo que resolve casos dos mais simples até os mais complexos, com o mesmo grau de dificuldade.

Resolver problemas de percolação com o uso do MEF, consiste em se determinar $\phi(x,y)$ que dá valores estacionários para o funcional dado pelo seguinte:

$$J = \int_V \frac{1}{2} \left\{ K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 - 2Q\phi \right\} dv - \int_{S_2} q\phi ds$$

A percolação em meios porosos se processa com um mínimo de energia. De acordo com o cálculo variacional, a variação de J para considerar a aproximação por elementos finitos:

$$\delta J = \int_V \left\{ K_x \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + K_y \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) - Q\delta\phi \right\} dv -$$

$$- \int_{S_2} q \delta \phi ds$$

Pode-se escrever em forma de matriz, sendo:

$$\delta J = \int_V \delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right) \delta \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right) \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{array} \right\} dV - \int_V \delta \phi Q dV - \int_{S_2} \delta \phi q ds$$

A equação matricial pode ainda ser escrita como:

$$\delta J = \int_V \delta \langle \nabla \phi \rangle^T [R] \langle \nabla \phi \rangle dV - \int_V \delta \phi Q dV - \int_{S_2} \delta \phi q ds$$

$$\text{onde: } \langle \nabla \phi \rangle = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{array} \right\}$$

$$\phi(x, y) = p_1 x + p_2 y + p_3$$

O valor de $\phi(x, y)$ é definido no interior do elemento como função dos valores de ϕ_0 em cada nó:

$$\phi(x, y) = [N][\phi_0]$$

$$\nabla \phi = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{array} \right\} = \left[\begin{array}{ccc} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \phi_3 \end{array} \right\}$$

$$\text{Sendo em forma abreviada: } \langle \nabla \phi \rangle = [N'] \langle \phi \rangle_0$$

As variações serão portanto:

$$\delta \phi = [N] \langle \delta \phi \rangle \quad \text{e} \quad \delta \langle \nabla \phi \rangle = [N'] [\delta \phi]$$

Agora procedendo a integração volumétrica, elemento por elemento, tem-se:

$$\int_{Ve} \delta \langle \nabla \phi \rangle^T [R] \langle \nabla \phi \rangle dV = \int_{Ve} \langle \delta \phi \rangle_e^T [N']^T [R] [N'] \langle \phi \rangle_e dV = \\ = \langle \delta \phi \rangle_e^T [K]_e \langle \phi \rangle_e$$

$$\text{onde: } \int_{Ve} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_1}{\partial y} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} \\ \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x & 0 \\ 0 & K_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial y} \end{bmatrix} dV$$

A outra integral volumétrica é:

$$\int_{Ve} \delta \phi Q dV = \int_{Ve} \langle \delta \phi \rangle_e^T [N]^T Q(x,y) dV = \langle \delta \phi \rangle_e^T \langle q \rangle_e$$

$$\text{onde: } \langle q \rangle_e = \int_{Ve} \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} Q(x,y) dV$$

A contribuição a δJ do elemento "e" é então:

$$\delta J_e = \langle \delta \phi \rangle_e^T [K]_e \langle Q \rangle_e - \langle \delta \phi \rangle_e^T \langle q \rangle_e$$

$$\langle \delta \phi \rangle_e^T ([K]_e \langle Q \rangle_e - \langle q \rangle_e) = 0$$

$$\langle q \rangle_e = [K]_e \langle Q \rangle_e$$

III.3 O PROGRAMA FPM500

O program FPM500 foi inicialmente desenvolvido por Taylor e Brown (1967) na Universidade da Califórnia, Berkeley. O programa permite a análise de fluxo estacionário, bidimensional e axissimétrico, confinado e não confinado pelo Método dos Elementos Finitos. Para o caso do fluxo não confinado, o programa determina a posição da superfície livre automaticamente.

O programa FPM500 já foi utilizado em várias teses de mestrado na COPPE. Lopes (1974) apresenta uma análise do

controle da água em escavações, Amorim (1976) analisou a percolação na Barragem Curuá-Una. Com o intuito de melhorar a análise de estudos de percolação seja em escavações, aterros etc., o programa foi usado por outros autores e ainda continua a ser usado como ferramenta importante em problemas de percolação.

Para a realização das simulações, nesta pesquisa, o programa exigiu a existência de arquivo de dados com as seguintes informações:

- Número de pontos nodais
- Número de elementos
- Número de materiais diferentes
- Número de pontos nodais deslocáveis (superfície livre)
- Tipo de problema $\left\{ \begin{array}{l} \text{fluxo axissimétrico} \\ \text{fluxo bidimensional} \end{array} \right.$
- Peso específico do fluido
- Carga de referência do potencial
- Carga hidráulica disponível nesta cota
- Fator de correção da superfície livre
- Número máximo de iterações para determinação da superfície livre
- Erro tolerável
- Permeabilidades principais dos materiais
- Coordenadas dos pontos nodais
- Valor da pressão prescrita, se for o caso, para cada ponto nodal
- Pontos nodais de cada elemento
- Ângulo entre a direção principal de permeabilidade 1 e o eixo x.
- Pontos nodais da superfície livre
- Ângulo entre a direção de correção dos pontos nodais da superfície livre e o eixo x

Após as resoluções, o programa cria um arquivo de saída com as seguintes informações:

- Todos os dados fornecidos e os gerados

automaticamente

- Cada iteração na correção da superfície livre
- Pressões e potenciais nos pontos nodais
- Velocidade de percolação (aparente) no centro de cada elemento e sua direção em relação ao eixo x.

CAPÍTULO IV

MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE TAPETES

O tapete aumenta o percurso da água, conseqüentemente diminui a vazão e as forças de percolação. Os métodos de dimensionamento de tapetes são baseados neste conceito. Nos cálculos é utilizada a lei de Darcy para fluxo em meios porosos.

Dimensionar um tapete, significa reduzir a vazão e os gradientes a valores satisfatórios ao bom funcionamento e segurança da obra. Com o barramento e formação do reservatório as perdas d'água podem ocorrer por infiltração, evaporação. As perdas por infiltração, exceto em terrenos cársticos, ocorrem principalmente por percolação através da fundação da barragem. De acordo com estudo hidrológico, pode-se obter através do balanço hídrico, a vazão de percolação pela fundação, admissível à obra. O comprimento do tapete, a seção transversal e o material utilizado serão definidos com o objetivo de obter vazões abaixo das máximas admissíveis e garantir a segurança necessária.

Serão apresentados neste capítulo métodos (ou critérios) de dimensionamento de tapetes impermeáveis a montante de barragens. Em uma barragem sobre fundação permeável que utilize o tapete como dispositivo redutor de percolação, o fluxo d'água ocorre preferencialmente pela fundação, já que a permeabilidade do tapete é geralmente muito menor do que a da fundação. O dimensionamento pode ser obtido com a aplicação pura e simples da Lei de Darcy, pois tendo-se a vazão admissível e o nível da água no reservatório, pode-se obter o comprimento necessário para a redução desejada da percolação. Desenvolvimentos posteriores foram introduzidos com o objetivo de aumentar a precisão no dimensionamento de barragens sobre fundações permeáveis sem interceptação da camada permeável como no

caso da utilização do tapete a montante. Pavlovsky-Dachler (citado por Davidenkof, 1964) e Turnbull e Mansur (1959) preocuparam-se em quantificar com mais realismo o comprimento médio de percolação. Com a utilização dos critérios de Lane (1935), Istomina (citado por Breth e Günther, 1970) e Khosla (citado por Hammad, 1963), é possível determinar os máximos gradientes (verticais) médios e de saída aceitáveis, de modo a evitar ocorrência de "piping". Com a metodologia de Bennett (1946) determina-se o comprimento efetivo do tapete, levando-se em conta que este elemento não é totalmente impermeável.

Os gradientes máximos admissíveis em fundações homogêneas, definidos a partir dos diversos critérios propostos, podem ser comparados com os gradientes de saída previstos. Sendo assim, é possível verificar se o dimensionamento do tapete atende a necessária segurança em relação ao carreamento de material ou "piping".

Os métodos para dimensionamento de tapetes, citados acima, serão estudados neste capítulo comparando os seus resultados com os obtidos pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Serão feitas análises de vazões, comparando os diversos métodos de cálculo e examinando as aproximações. Os gradientes de saída serão calculados com o MEF para casos de anisotropia do solo de fundação. Como a permeabilidade do tapete pode ser levada em conta pelo MEF, o comprimento efetivo, calculado por este método, será comparado com o obtido por Bennett (1946). Verificar-se-á, também, a melhor ou a mais eficiente seção transversal para o tapete, na redução da percolação e dos gradientes de saída.

IV.1 APRESENTAÇÃO DOS MÉTODOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE TAPETES

O comprimento do tapete necessário à obtenção do bom funcionamento e segurança da obra, pode ser obtido através

dos procedimentos acima citados, sendo alguns deles complementares. A seguir, estes métodos são descritos de forma sucinta.

A) ANALOGIA COM PERMEÂMETRO VERTICAL (CÁLCULO SIMPLIFICADO UTILIZANDO A LEI DE DARCY)

Através da aplicação simplificada da Lei de Darcy, pode-se dimensionar um tapete. O comprimento do tapete (B') será tal que se obtenha a necessária redução de vazão. Neste caso, admite-se que o comprimento de percolação seja igual a soma do comprimento do tapete mais a largura da base da barragem (Figura IV.1):

$$B' = \frac{K H D}{Q} - B$$

onde: B - comprimento de percolação abaixo da barragem;
 B' - comprimento do tapete;
 D - espessura da camada permeável;.
 Q - vazão máxima admissível;
 K - permeabilidade da fundação;
 H - carga hidráulica no reservatório.

A seção transversal do tapete deve ser escolhida de maneira que possa ser assumida a sua impermeabilidade. É muito usada a forma triangular com a altura no pé da barragem igual a um centésimo do comprimento do tapete e não inferior a um metro (Esteves, 1961).

B) PAVLOVSKY-DACHLER

Pavlovsky-Dachler (citados por Davidenkoff, 1964) verificaram que existia uma relação entre o comprimento de percolação da água e a profundidade da camada permeável, para o qual o cálculo da vazão poderia se aproximar ou não da vazão obtida de maneira simplificada pela Lei de Darcy

(Item IV.1A). Para valores baixos desta relação a vazão obtida por Pavlovsky-Dachler diminui bastante com relação a calculada pelo processo do Item IV.1A. Como pode ser visualizado na Figura IV.2, para pequenos comprimentos do tapete em relação à profundidade do aluvião, o comprimento médio de percolação é influenciado pelos percursos de entrada e saída da água na camada permeável.

Quando o comprimento do tapete é suficientemente grande para definir um fluxo preferencialmente horizontal pela fundação, o percurso sofrerá pequena influência da entrada e saída da água no meio poroso. A fórmula de Pavlovsky-Dachler para cálculo da vazão, levando-se em conta estes aspectos é apresentada a seguir:

$$B' = \frac{K H D}{Q} - 0.88D - B$$

C) TURNBULL E MANSUR

Turnbull e Mansur (1959) apresentam fórmula, baseados no mesmo pressuposto de Pavlovsky-Dachler. Entretanto a influência da entrada e saída do percurso médio de percolação foi considerada de menor importância, pois com a construção do tapete o comprimento total de percolação é quase sempre muito maior do que a espessura da fundação. A fórmula para o cálculo do comprimento do tapete é:

$$B' = \frac{K H D}{Q} - 0.43D - B$$

Além disso, a exigência de que as forças de percolação devem ser de uma grandeza tal que não dêem origem a erosão foi também contemplada. Através da análise de dados de instrumentação de diques do Rio Mississipi, Turnbull e Mansur (1959) obtiveram condições de percolação em função dos gradientes de saída aceitáveis para areia fina recoberta por camada de solos siltosos (Tabela IV.1). Embora os resultados apresentados na Tabela IV.1 não se

constituam em um critério de uso geral, podem ser utilizados em situações semelhantes. Em uma fundação com camada superficial de menor permeabilidade, o gradiente vertical de saída pode ser determinado da seguinte maneira (Figura IV.3):

$$i_a = \left[\frac{H X_r'}{Z_b (X_r' + X_r + B)} \right]$$

H - nível da água no reservatório;

X_r' - comprimento efetivo à jusante;

X_r - comprimento efetivo à montante

Z_b - espessura da camada superficial a jusante;

B - comprimento de percolação abaixo da base da barragem.

CONDIÇÕES DE PERCOLAÇÃO	GRADIENTE DE SAÍDA		
Baixa ou nenhuma percolação	0.0	-	0.5
Percolação média	0.2	-	0.6
Percolação alta	0.4	-	0.7
Borbulhamento	0.5	-	0.8

Tabela IV.1 Condições de percolação nos diques do Rio Mississippi

D) LANE

Com base nos estudos de Griffith e Bligh, Lane (1935) determinou comprimentos de percolação mínimos com relação ao nível da água no reservatório, para que não ocorresse "piping". A maior contribuição dada por Lane foi a admissão de que o caminhamento vertical da água é mais difícil do que o horizontal. Ou seja, Lane determinou que o somatório dos percursos verticais acrescidos de um terço do somatório dos percursos horizontais, dividido pela altura do nível da água no reservatório deve ser igual ou maior do que um determinado coeficiente. Os valores deste coeficiente (Tabela IV.2), que garantiriam a segurança ao

"piping", foram obtidos através do estudo estatístico de mais de 200 barragens em funcionamento, para vários tipos de solo de fundação.

$$C = \frac{\sum L_v + (1/3)\sum L_h}{\Delta H}$$

onde: L_v - comprimento vertical de percolação;
 L_h - comprimento horizontal de percolação;
 ΔH - carga hidráulica disponível.

Assim é possível obter um comprimento tal para o tapete, que apresentando um coeficiente superior ao mínimo indicado na Tabela IV.2 para o tipo de solo de fundação da barragem, evite a ocorrência de erosão interna.

TIPO DE SOLO	CC min)
Areia muito fina ou silte	8.5
Areia fina	7.0
Areia média	6.0
Areia grossa	5.0
Pedregulho fino	4.0
Pedregulho médio	3.5
Pedregulho grosso	3.0
Blocos grandes com pedregulhos	2.5
Argila mole a dura	3.0 a 1.6

Tabela IV.2 Coeficientes de Lane

E) KHOSLA

Hammad (1963) apresenta fatores de segurança recomendados por Khosla, para gradientes críticos de saída calculados por Terzaghi. Os fatores de segurança dependem do tipo de aluvião (Tabela IV.3).

$$i_c = (\gamma_{sat} - \gamma_w) (1 - e)$$

i_c - gradiente de saída crítico;

- γ_s - peso específico do solo de fundação;
 γ_v - peso específico da água;
 e - índice de vazios do solo de fundação.

Tipo de solo	Fator de segurança		
Cascalho	4	a	5
Areia grossa	5	a	6
Areia fina	6	a	7

Tabela IV.3 Fatores de segurança de Khosla

O valor limite obtido pelas considerações acima, deve ser comparado com o gradiente de saída do fluxo pela fundação. No caso de uma fundação homogênea sem camada superior de menor permeabilidade, o gradiente de saída pode ser calculado segundo Polubarinova-Kochina (citados por Harr, 1962). Admitindo que a largura da base do dreno de pé seja igual a um terço de H, o gradiente, calculado para o final do dreno, (Figura IV.4) é:

$$i_s = \frac{2 \frac{H}{L}}{\pi \sqrt{\left(1 + \frac{2}{3} \frac{H}{L}\right)^2 - 1}}$$

sendo: H - carga hidráulica;
 L - comprimento total de percolação.

F) ISTOMINA

Istomina (citado por Breth e Günther, 1970) determinou os gradientes de saída máximos admissíveis com base no coeficiente de uniformidade dos solos de fundação (Tabela IV.4). O comprimento do tapete deve ser tal que os gradientes indicados nesta tabela não sejam superados. O coeficiente de uniformidade para este estudo, determina a quantidade de solo fino presente na fundação que pode sofrer processo de lavagem pela ação das forças de percolação.

COEF. DE UNIFORMIDADE DO SOLO	GRADIENTE DE SAÍDA		
$U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$	i_s		
$U < 10$	0.3	-	0.4
$10 \leq U < 20$	0.2		
$U \geq 20$	0.1		

Tabela IV.4 Critérios de Istomina

G) BENNETT

Bennett (1946), introduziu o conceito de comprimento efetivo do tapete que seria o comprimento de um prisma do material de fundação de espessura D e permeabilidade K_f , no qual sob uma carga H ocorre um fluxo equivalente ao que passa pelo sistema com um tapete nas mesmas condições (Figura IV.5). O comprimento efetivo é a medida da eficiência do tapete, sendo igual ou menor do que o seu comprimento real. Isto ocorre porque a vazão através do tapete contribui na vazão total pela fundação.

O comprimento efetivo definido por Bennett (1946) é função das espessuras e permeabilidades do tapete e da fundação. Para tal Bennett determinou os parâmetros " a " e " α " que caracterizam cada situação.

$$a = \sqrt{\frac{K_b}{K_f D Z_b}} ; \quad \alpha = \frac{K_b}{D K_f}$$

onde: K_b - permeabilidade do tapete;
 K_f - permeabilidade da fundação;
 Z_b - espessura do tapete;
 D - espessura da fundação.

Para um tapete infinito, o comprimento efetivo (X_r) é dado pela seguinte fórmula:

$$X_r = \frac{1}{a}$$

Para o tapete finito de forma retangular, tem-se o comprimento efetivo dado pelo seguinte:

$$X_r = \frac{\tanh(aL)}{a}$$

Para o tapete de forma triangular Bennett (1946) se deparou com uma série bastante extensa e de convergência lenta. Sendo assim Bennett aproximou a superfície do tapete de seção triangular a uma parábola:

$$Z_b = \frac{\alpha L^2}{n(n-1)} ; \quad X_r = \frac{L}{n}$$

onde: n - constante que define o perfil curvo do tapete

Para um tapete de seção triangular sobre camada superficial de menor permeabilidade:

$$X_r = \frac{Z_b}{\alpha L + \beta} ; \quad Z_b = \frac{\alpha L^2}{2} + \beta L + Z_{b0}$$

$$X_{r'} = \sqrt{\frac{K_f D Z_{b1}}{K_{b1}}} ; \quad Z_{b0} = \frac{K_b Z_{b1}}{K_{b1}} ; \quad \beta = \frac{Z_{b0}}{X_{r'}}$$

Bennett (1946) determinou vários pares de valores de (a, L) para tapete de espessura constante com um mesmo comprimento efetivo, obtendo assim um comprimento ótimo de um tapete, ou seja, o comprimento onde se obtém o menor volume de material para uma determinada eficiência (Figura IV.6).

Este método complementa os demais já apresentados, ou seja, a redução das descargas freáticas e dos gradientes deve ser obtida pelo comprimento efetivo do tapete e não a partir da sua dimensão real.

IV.2 ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Na verificação, através do Método dos Elementos Finitos (MEF), dos métodos de dimensionamento de tapetes foram adotadas duas seções fictícias: (a) uma barragem homogênea assente sobre um aluvião permeável, portanto com fluxo não confinado, (b) barragem homogênea, assumida impermeável, também assente sobre um aluvião permeável, apresentando fluxo confinado. O comprimento, permeabilidade, espessura e forma do tapete são variáveis de acordo com o objetivo da simulação. As demais características destas barragens estão indicadas a seguir:

a) Barragem de terra homogênea (Figura IV.7)

- $\Delta H = 15.0m$
- $D = 15.0m$
- $B = 90.00m$
- $K \text{ (maciço)} = 10^{-9} m/s$
- $K_f \text{ (fundação)} = 10^{-4} m/s$

b) Barragem de terra homogênea, assumida impermeável (Figura IV.8)

- $\Delta H = 30.00m$
- $D = 20.00m$
- $B = 100.00m$
- $K_f \text{ (fundação)} = 10^{-5} m/s$

Na delimitação da malha de elementos finitos foram levados em conta as condições de entrada e saída do fluxo pela fundação. O trecho da malha de entrada e saída de fluxo deve ter comprimento tal que satisfaça as condições reais de campo. Quanto maior o grau de anisotropia do solo de fundação maior deverá ser o trecho da malha de entrada e saída de fluxo. Também para casos de camada superior de menor permeabilidade, o trecho deverá também crescer para modelar as condições reais (Figura IV.9).

Nas simulações para verificação dos métodos de cálculo de vazão o tapete é admitido impermeável, pois o

seu coeficiente de permeabilidade é "infinitamente" (ou seja, tão pequeno que pode ser desprezado) menor do que o da fundação. Variou-se então o seu comprimento sendo utilizadas as duas seções fictícias. Para o estudo dos gradientes foi adotada a seção fictícia que apresenta fluxo não confinado (Figura IV.7). Os gradientes de saída foram medidos na extremidade do dreno de pé.

Calculada a vazão com os resultados obtidos pelo MEF (fluxo obtido dos elementos do trecho da malha na fundação), o comprimento efetivo é determinado utilizando-se a lei de Darcy, como indicado no Item IV.1A. Nas simulações para comparação com o método de Bennett (1946), foram utilizadas as duas seções fictícias. Para tapetes retangulares variou-se o comprimento do tapete desde 100.00m até 300.00m com a seção que apresenta fluxo não confinado. Para tapetes triangulares utilizou-se a seção com fluxo confinado. Variou-se o comprimento de um tapete triangular, mantendo a mesma área de um retangular de 100.0m.

Para comparação da eficiência das seções transversais (retangular e triangular) foram também utilizadas as duas seções fictícias. Para a seção da barragem que admite fluxo não confinado, o tapete retangular teve 100.00m (comprimento ótimo) e variou-se o comprimento de um tapete triangular mantendo-se a mesma área. Também, a partir de uma seção triangular de 100.00m e de mesma área de um retangular ótimo, variou-se a sua altura e conseqüentemente a área. Na seção da barragem que admite fluxo confinado o tapete retangular variou de 100.00m a 300.00m. Para cada tapete retangular ótimo, variou-se o comprimento de um triangular, mantendo-se a mesma área, e também variou-se a altura do triangular a partir da mesma área do retangular ótimo.

A seguir são examinados os resultados obtidos nas simulações pelo MEF de acordo com os aspectos:

(a) vazão;

- (b) gradientes;
- (c) comprimento efetivo;
- (d) seção transversal.

A) VAZÃO

Observou-se, através das simulações, que a aplicação simples da Lei de Darcy foi a maneira mais conservadora de se obter a vazão pela fundação, principalmente quando o comprimento total de percolação aproxima-se da espessura da camada permeável. Neste caso a razão (r) entre o comprimento total de percolação e a espessura da camada permeável tende para 1.

$$r = \frac{(B + B')}{D} \rightarrow 1$$

Como se pode ver na Figura IV.10, para valores de r em torno de 3, a estimativa de vazão para fundação isotrópica, aplicando a Lei de Darcy, é aproximadamente 30% mais elevada do que a obtida pelo MEF. Entretanto para valores de r acima de 10 ocorre uma convergência de resultados. Os dados foram obtidos para fundação isotrópica, com permeabilidade do tapete muito menor do que a da fundação, ou seja, a contribuição da vazão pelo fluxo através do tapete não tem valor significativo. Como a previsão de vazão de percolação usando simplificadaamente a Lei de Darcy só admite fluxo pela fundação no sentido horizontal, os valores obtidos pelo MEF se afastam quando se admite anisotropia para a fundação (Figura IV.10).

Aplicando Pavlovsky-Dachler (citados por Davidenkoff, 1964), verifica-se a aproximação com os resultados obtidos nas simulações para fundações isotrópicas, mesmo para valores baixos de " r " (Figura IV.10). No entanto, os resultados das simulações divergem para fundações anisotrópicas, o que era esperado, uma vez que estes autores também admitem uma só permeabilidade na fundação (Figura IV.10).

Usando a formulação de Turnbull e Mansur (1959), verifica-se que para valores mais altos de "r", a convergência se torna melhor do que Pavlovsky-Dachler (Figura IV.10). Embora observando que uma convergência tende a ocorrer com todos os resultados, para casos de anisotropia da fundação Turnbull e Mansur tornam-se um pouco distantes dos obtidos pelo MEF (Figura IV.10)

B) GRADIENTES

A única característica do solo de fundação que o programa leva em conta é a permeabilidade, assim com o refinamento da malha pode-se determinar os gradientes verticais na saída do fluxo pela fundação, entretanto não é possível concluir quanto a ocorrência ou não de erosão. No entanto, foi possível, através do MEF, verificar que os gradientes são crescentes com o grau de anisotropia do solo de fundação. Nas simulações adotou-se a permeabilidade horizontal constante e variou-se, para menor, a permeabilidade vertical. Os resultados estão indicados na Figura IV.11 onde podem ser comparados com os obtidos por Polubarinova-Kochina (citados por Harr, 1962).

C) COMPRIMENTO EFETIVO

As simulações foram feitas, com objetivo de verificar o cálculo do comprimento efetivo obtido por Bennett (1946). O tapete de seção constante ou retangular deve ter comprimento ótimo, ou seja, o valor de $aL = \sqrt{2}$, pois para esta situação se tem a máxima eficiência com um gasto mínimo de material. O comprimento efetivo obtido por Bennett para tapete de seção transversal retangular aproximou-se bastante dos resultados obtidos nas simulações (Figura IV.12), ficando em torno de 0.63L. Logo abaixo pode-se ver a dedução da eficiência de um tapete retangular de comprimento ótimo, de acordo com Bennett:

Sabe-se que $aL = \sqrt{2}$ e portanto,

$$a = \frac{\sqrt{2}}{L}$$

$$X_r = \frac{\tanh(aL)}{a}, \quad X_r = \frac{\tanh(\sqrt{2})L}{\sqrt{2}} \quad \text{assim,}$$

$$X_r = 0.63L$$

Para analisar o comportamento do tapete de seção transversal triangular foram feitas simulações mantendo a área da seção igual a do tapete retangular de comprimento ótimo. Observou-se (Figura IV.13) que para os comprimentos de maior eficiência, os resultados obtidos por Bennett distanciavam-se daqueles obtidos nas simulações. Isto se deve a simplificações admitidas por Bennett na determinação do comprimento efetivo de tapete de seção triangular. Ele adotou, para efeito de cálculos, que a superfície do tapete tem forma parabólica obtendo assim, valores mais conservativos. Já com o crescimento do comprimento do tapete triangular e manutenção da mesma área da seção transversal, os resultados das simulações convergem para os de Bennett. Com o crescimento do tapete, a parábola tende a se aproximar de uma reta, justificando esta melhor aproximação. E para o caso de comprimentos pequenos do tapete triangular com mesma área do retangular ótimo, os resultados das simulações aproximam-se dos de Bennett, pois o comprimento efetivo do tapete triangular se aproxima do seu comprimento real e mesmo com as simplificações de Bennett ocorre a convergência.

D) SEÇÃO TRANSVERSAL

Como foi visto, os tapetes podem ter seção transversal em forma de triângulo ou retângulo. Nestas simulações objetivou-se determinar a relação entre as eficiências de dois tapetes, um retangular e outro triangular, de mesma área da seção transversal. Sendo o tapete retangular de comprimento ótimo, observou-se que com

a variação do comprimento do tapete triangular, o seu comprimento efetivo pode ser maior, menor ou igual ao comprimento efetivo do tapete retangular (Figura IV.14).

É evidente que quando os tapetes são do mesmo comprimento e mesma área da seção transversal, o triangular deve apresentar maior eficiência, pois na extremidade de montante do tapete, o gradiente hidráulico é quase nulo, sendo assim não há necessidade de grande espessura do tapete. Já no pé de montante da barragem, o gradiente hidráulico é maior e assim é preciso aumentar a espessura do tapete para diminuir a vazão através deste. Confirmando esta expectativa, na simulação feita pelo MEF, o comprimento efetivo do tapete triangular de mesma dimensão e área do retangular ótimo, foi de aproximadamente 0.70L.

No prosseguimento das simulações, aumentou-se o comprimento do tapete triangular (mantendo a mesma área da seção) e obteve-se a relação (Figura IV.14):

$$\frac{L_{ret}}{L_{tri}} = 0.50;$$

L_{ret} = Comprimento real do tapete retangular;

L_{tri} = Comprimento real do tapete triangular;

para o qual teriam a mesma eficiência. Da mesma forma diminuindo o tapete triangular em relação ao retangular de comprimento ótimo, eles terão o mesmo comprimento efetivo quando (Figura IV.14):

$$\frac{L_{ret}}{L_{tri}} = 1.38$$

Como foi visto, o comprimento efetivo do tapete triangular é maior do que o do retangular. Por este motivo foram feitas novas simulações com a redução da área da seção transversal do tapete triangular. Como se pode observar na Figura IV.15, o ponto de mesma eficiência é obtido quando:

$$\frac{Z_{bret}}{Z_{btri}} = 1.42$$

IV.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados alguns métodos e critérios para dimensionamento de tapetes impermeabilizantes a montante de barragens. Estes métodos foram comparados com o MEF e as conclusões obtidas são apresentadas a seguir.

No cálculo da vazão a proposição de Turnbull e Mansur (1959) apresentou-se mais próxima dos resultados obtidos pelo MEF, sendo portanto indicados para a utilização em projeto.

A formação do "piping" está ligada a ocorrência de altos gradientes e do tipo de solo de fundação. Com base em observações práticas foram mostrados neste capítulo alguns critérios para o dimensionamento de barragens sobre fundações permeáveis. Critérios como os de Lane (1935) podem apresentar-se bastante conservativos, no entanto devem ser utilizados como estimativa inicial de projeto.

Na maioria das situações é o gradiente que vai determinar o comprimento necessário do tapete. Por este motivo no roteiro para dimensionamento de tapetes impermeabilizantes, apresentado no próximo capítulo (Capítulo V), são feitas recomendações no tocante a gradientes máximos admissíveis na determinação do comprimento do tapete, baseado na bibliografia aqui apresentada.

No projeto de tapetes, a utilização do conceito de comprimento efetivo proposto por Bennett (1946) é de grande valia. O tapete pode ser dimensionado com o seu comprimento ótimo, tendo um gasto mínimo de material para a eficiência desejada.

A seção transversal do tapete deve ter forma triangular, pois as simulações feitas pelo MEF mostraram uma maior eficiência desta seção quando comparada com a forma retangular.

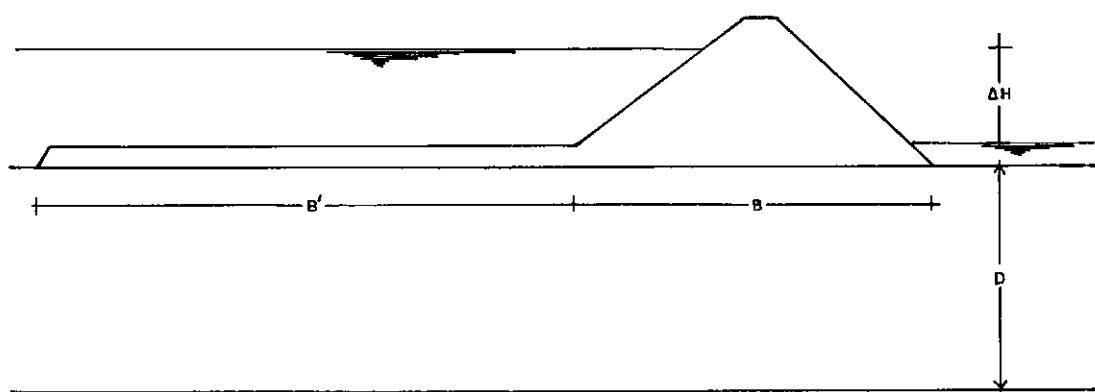
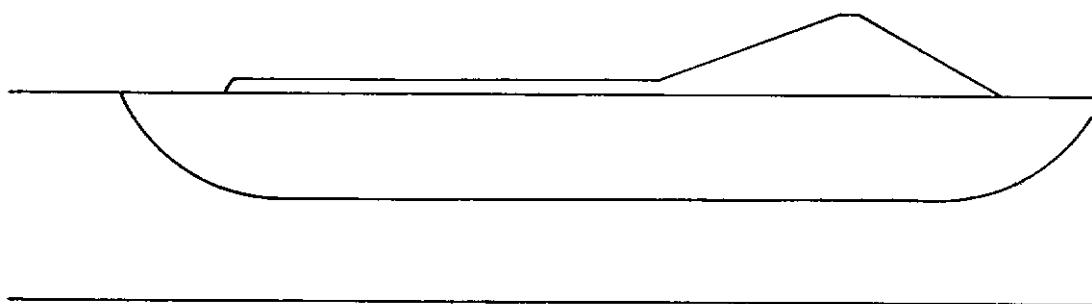
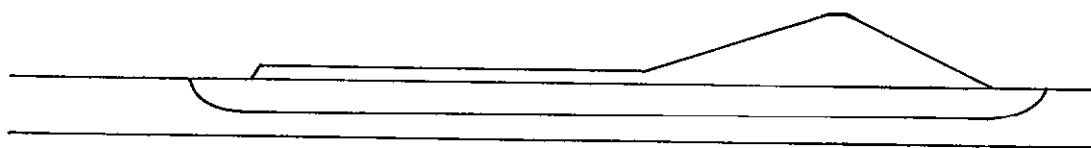


Figura IV.1 Desenho esquemático de uma barragem com tapete sobre fundação permeável



GRANDE INFLUENCIA



PEQUENA INFLUENCIA

Figura IV.2 Relação entre o comprimento de percolação e a espessura da camada permeável na definição do comprimento médio de percolação

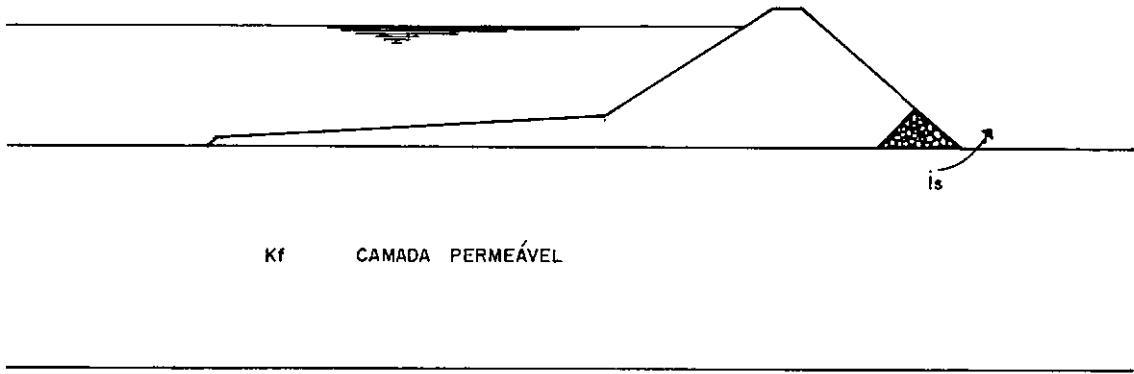


Figura IV.3 Gradiente de saída em fundação homogênea sem camada superior de menor permeabilidade

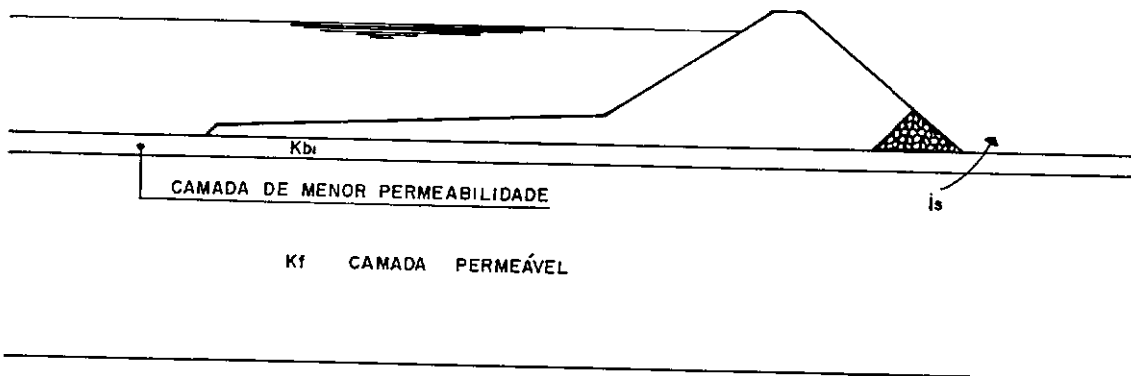


Figura IV.4 Gradiente de saída em fundação homogênea com camada superior de menor permeabilidade

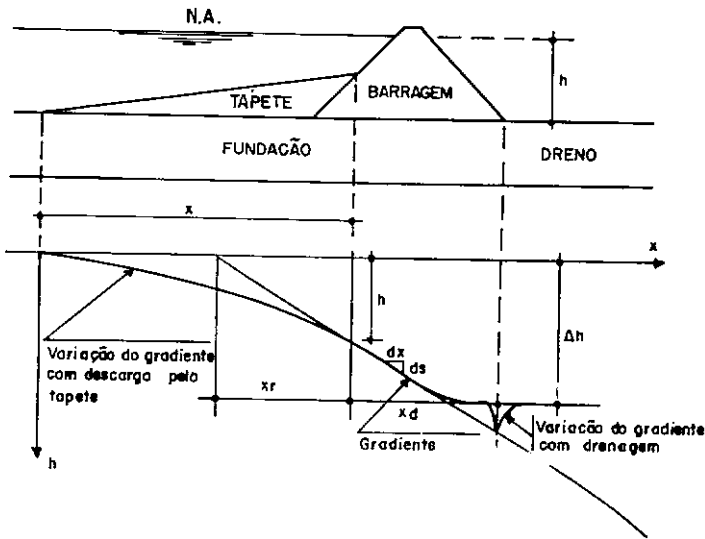


Figura IV.5 Comprimento efetivo de um tapete (x_r)

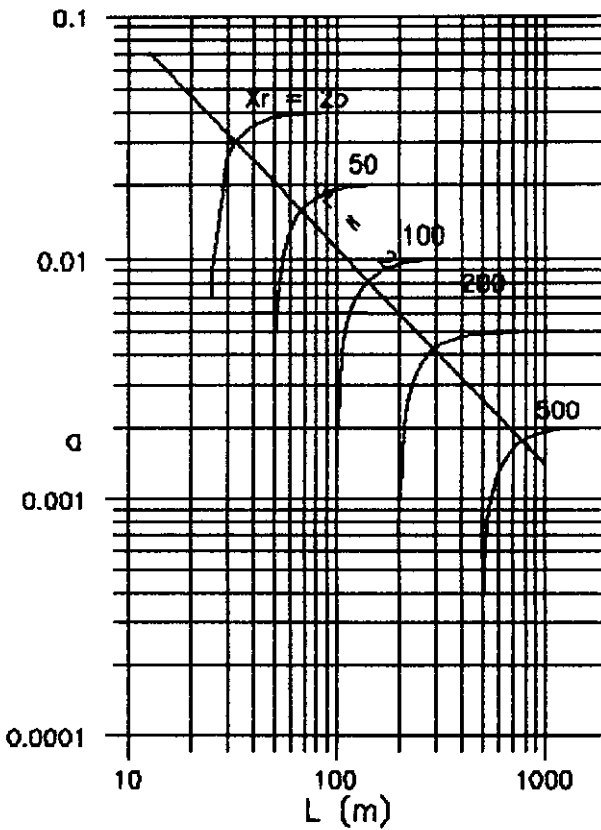


Figura IV.6 Reta $aL = \sqrt{2}$ que caracteriza os comprimentos ótimos para cada tapete

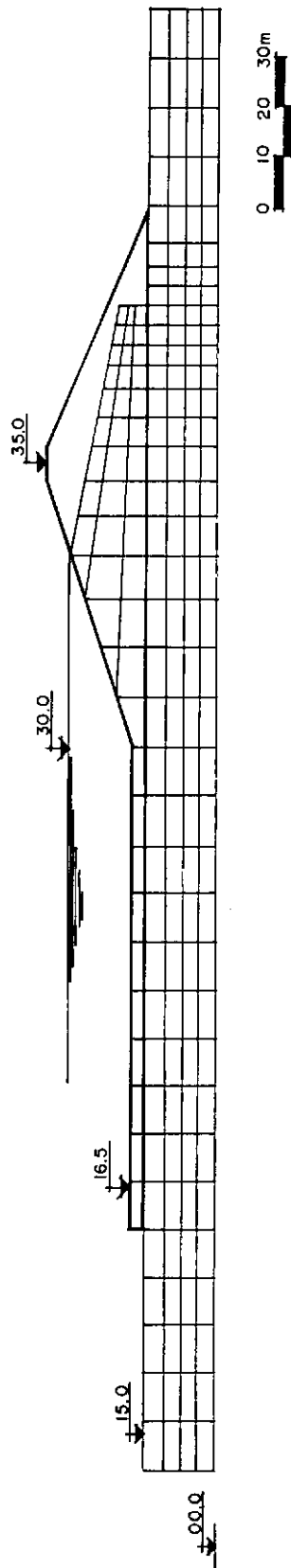


Figura IV.7 Malha de elementos finitos I

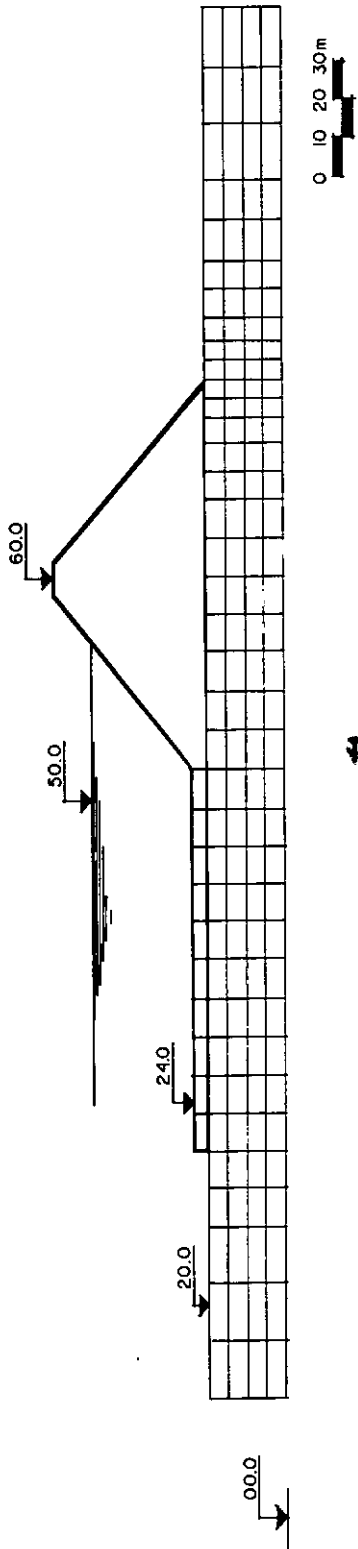


Figura IV.8 Malha de elementos finitos II

- (1) Fundação Isotrópica
- (2) $K_{fh}/K_{fv} = 10$
- (3) $K_{fh}/K_{fv} = 100$
- (4) $K_f/K_{b1} = 10$
- (5) $K_f/K_{b1} = 100$

Q - Vazão para o trecho de entrada da malha de X(m)
 Q₀ - Vazão para o trecho da malha de entrada X/H = 1.30
 X - Comprimento do trecho da malha na entrada do fluxo
 H - Carga hidráulica

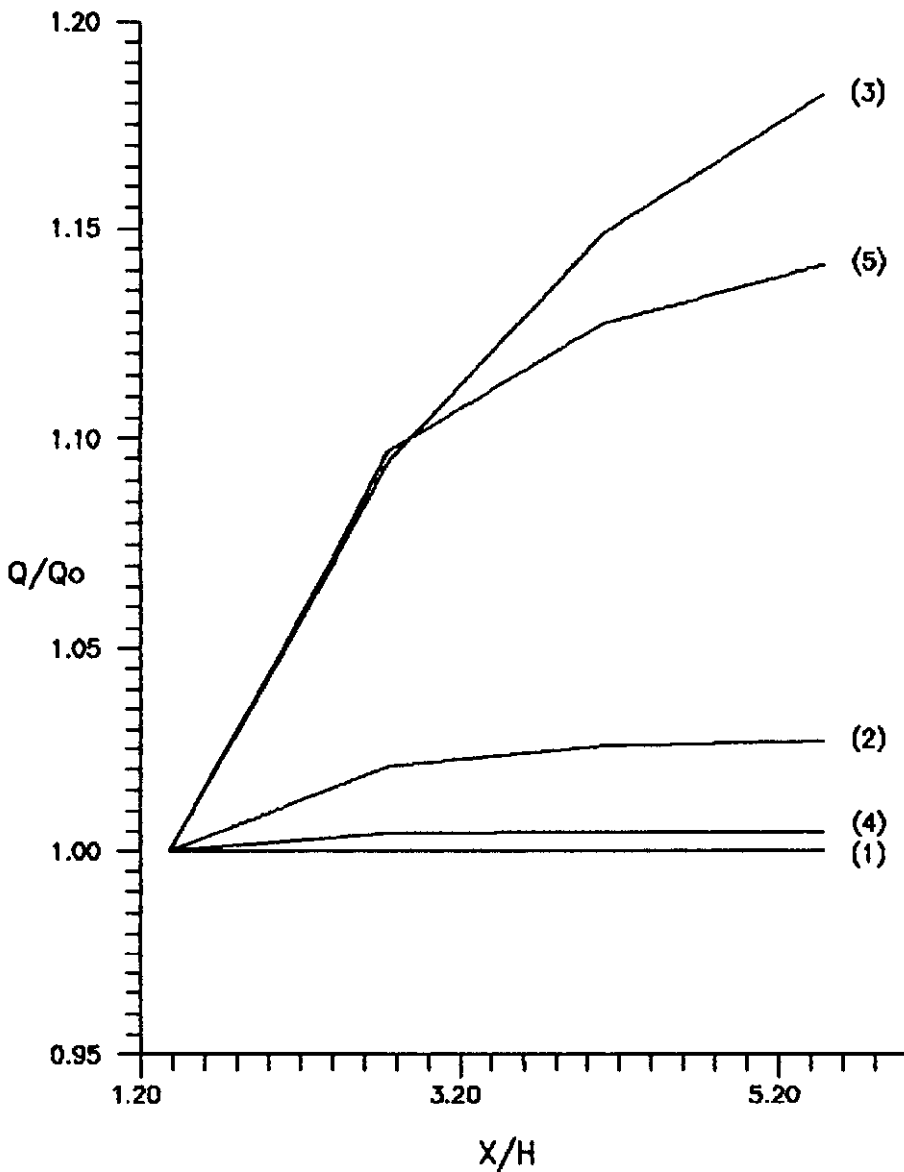


Figura IV.9 Influência do comprimento do trecho de entrada da malha

Q - Vazão pela fundação
 K - Permeabilidade da fundação
 H - Carga hidráulica disponível
 B - Comprimento de percolação abaixo do maciço
 B' - Comprimento de percolação abaixo do tapete

(I) $K_{fh}/K_{fv} = 1$
 (II) $K_{fh}/K_{fv} = 2$
 (III) $K_{fh}/K_{fv} = 10$

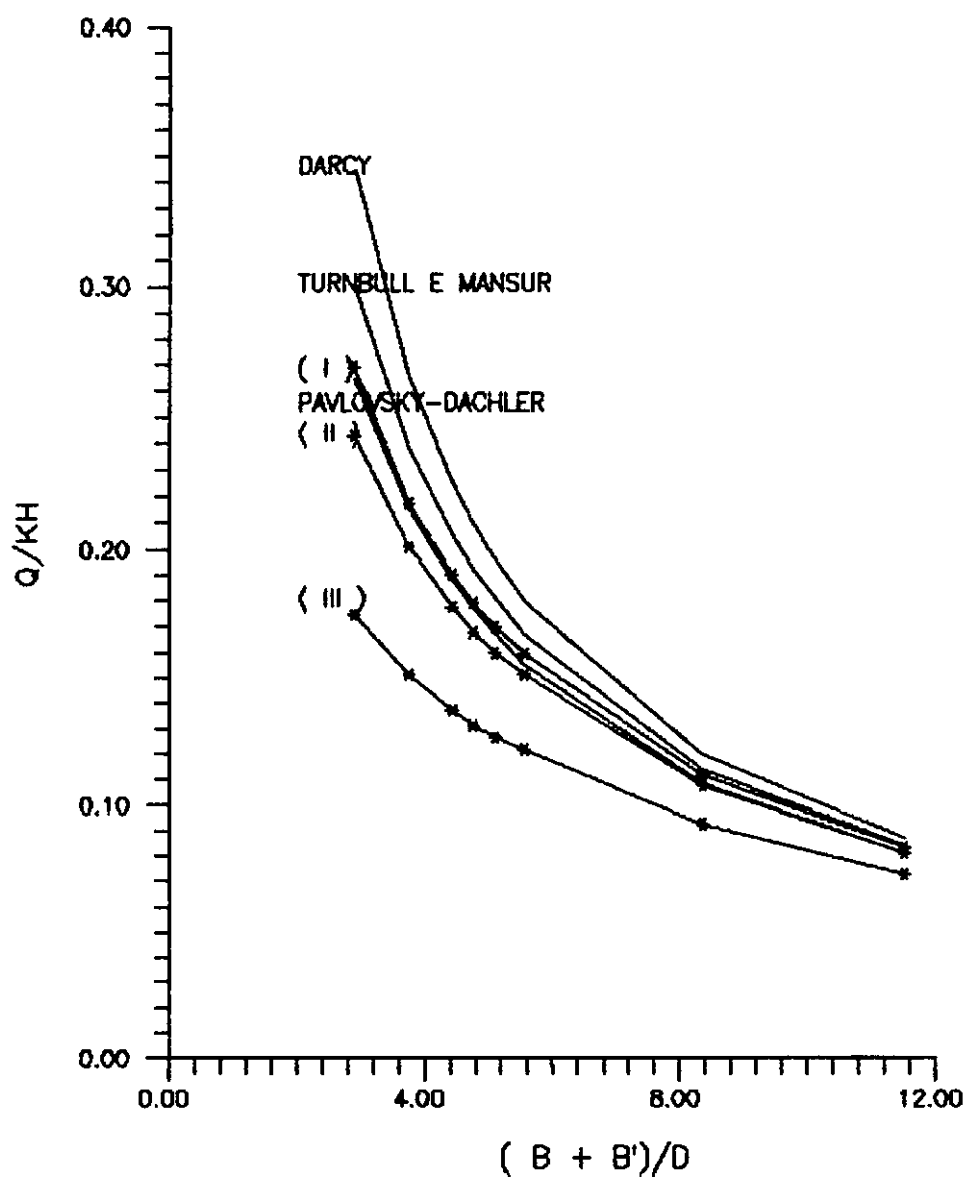


Figura IV.10 Cálculo da vazão (Darcy, Pavlovsky-Dachler, Turnbull e Mansur e MEF)

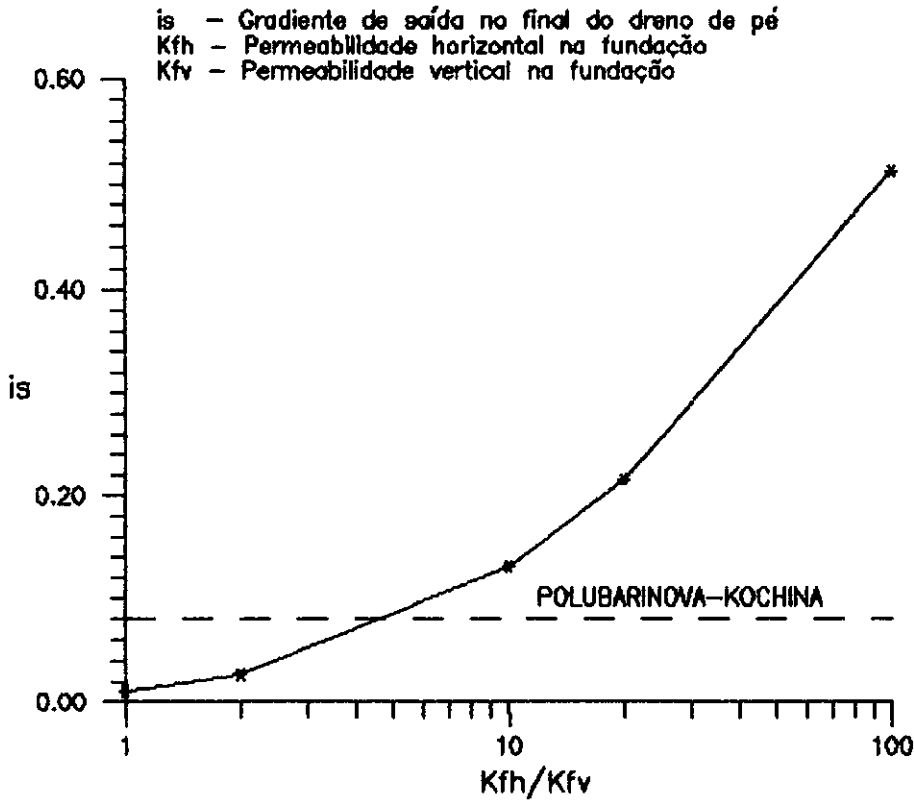


Figura IV.11 Variação do gradiente de saída com a anisotropia do solo de fundação

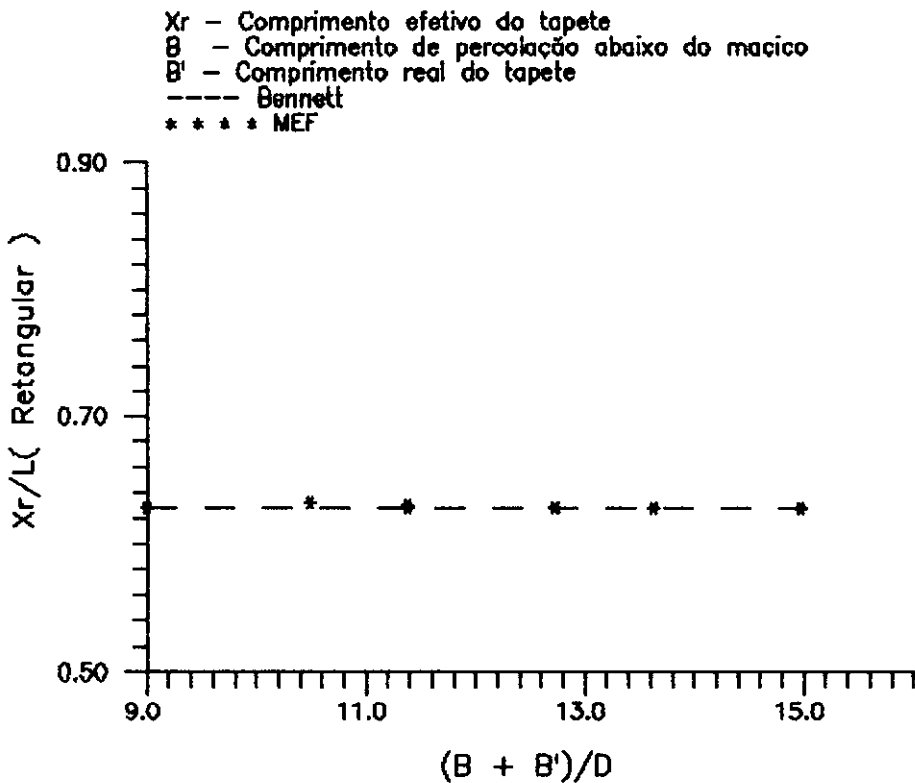


Figura IV.12 Tapete retangular com seu comprimento efetivo calculado por Bennett e pelo MEF

X_r - Comprimento efetivo do tapete
 B - Comprimento de percolação abaixo da maçoica
 B' - Comprimento real do tapete
 ---- Bennett
 *** MEF

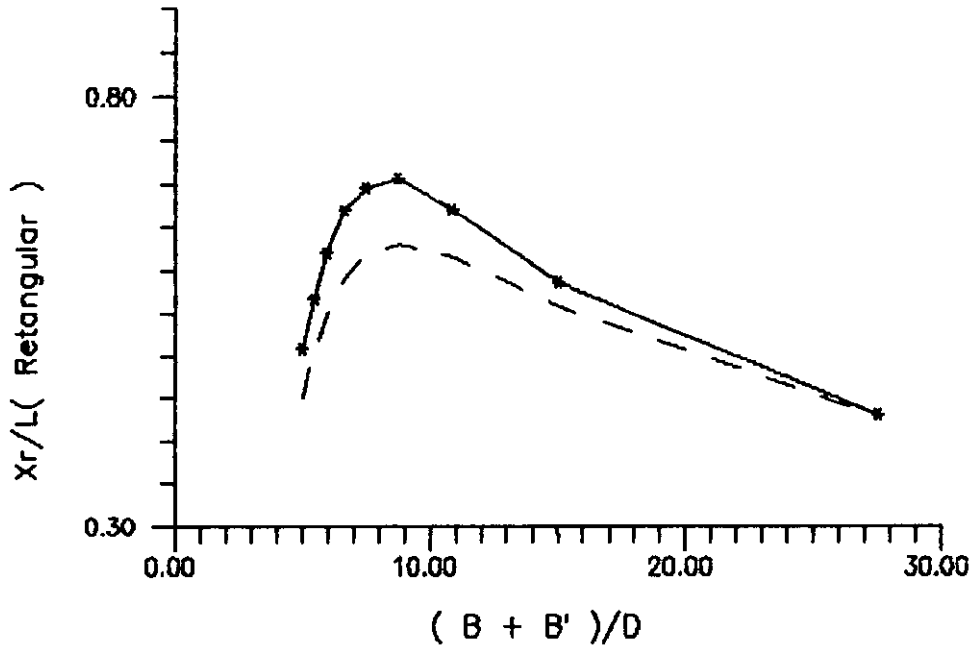


Figura IV.13 Tapete triangular de mesma área de um retangular de comprimento efetivo calculado por Bennett e pelo MEF

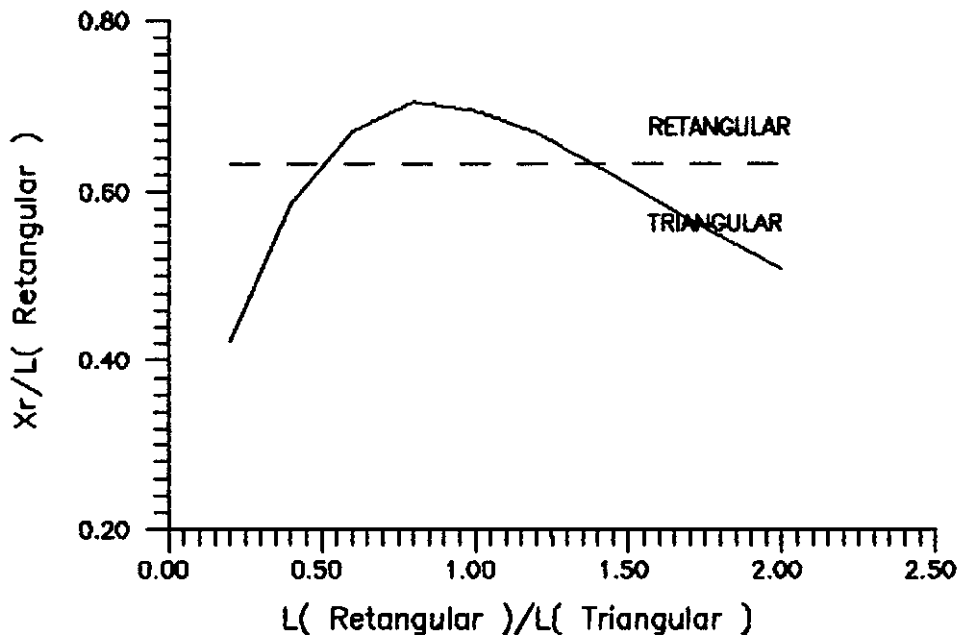


Figura IV.14 Tapete retangular de comprimento ótimo e outro triangular de mesma área para vários comprimentos. Pontos de mesma eficiência

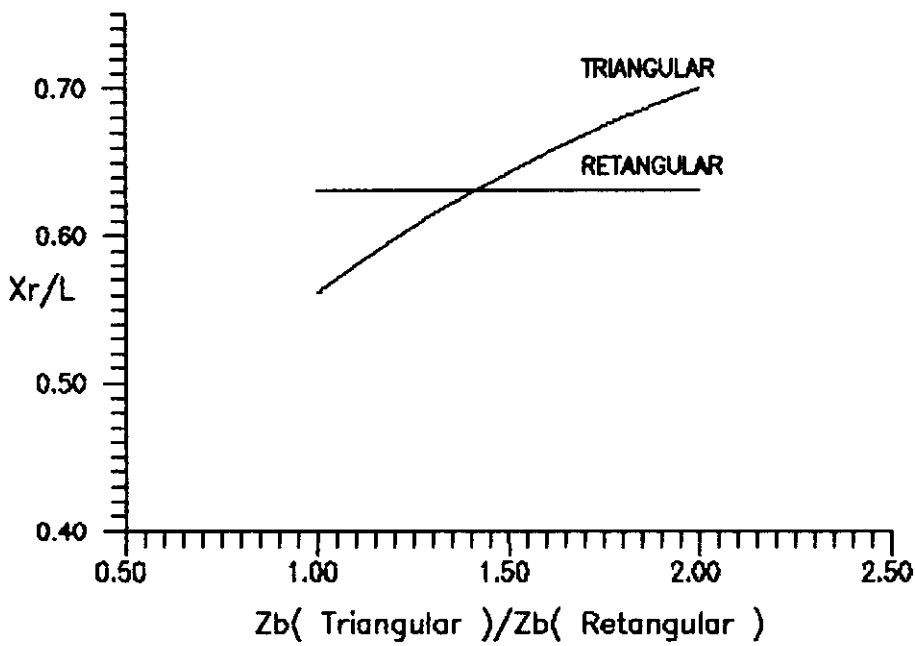


Figura IV.15 Tapete retangular de comprimento ótimo e mesmo comprimento de um triangular. Ponto de mesma eficiência com redução de área do tapete triangular com relação ao retangular

CAPÍTULO V

ROTEIRO PARA PROJETO DE TAPETE IMPERMEABILIZANTE

No dimensionamento de uma barragem de terra constam algumas etapas bem distintas. Após as conclusões dos estudos hidro-climatológicos da bacia hidrográfica e do levantamento topográfico da bacia hidráulica, onde se construirá a barragem, é possível se determinar a altura da água no reservatório, que garantirá o volume de armazenamento necessário. Assim pode-se dar início aos estudos geológicos e geotécnicos do local da obra. Para uma barragem de terra, obtém-se desta maneira, a altura da barragem, as inclinações dos taludes, a largura do coroamento e tipos de materiais. Estando a barragem apoiada sobre uma camada permeável de espessura considerável, pode-se então dar início ao projeto de dispositivo de controle de percolação pelas fundações.

O controle da percolação pelas fundações poderá ser feito com um tapete impermeável a montante de barragens. Esta escolha é feita baseada em razões já expostas neste trabalho (Capítulo II). A segurança da barragem deve ser garantida limitando-se a fuga da água pela fundação a valores inferiores aos máximos permissíveis, e com gradientes que não atinjam valores instabilizantes quanto a formação do "piping", nem produzam efeitos de levantamento ("blow up") a jusante da barragem. No capítulo IV foram mostrados alguns critérios quanto a segurança da obra. Estes, apesar de algumas vezes acarretarem valores bastante conservativos podem ser utilizados como estimativa inicial. Tanto a vazão máxima como o gradiente máximo permissível, determinando o comprimento de percolação que deverá ser criado pelo tapete, podem ser o aspecto predominante no projeto.

Neste capítulo será apresentado um roteiro para dimensionamento de tapete a montante de barragens. Serão

analisados dois tipos de vales: vale com alargamento a montante da barragem e vale sem alargamento (Figura V.1). O roteiro poderá ser utilizado no dimensionamento de tapetes sobre fundação permeável homogênea admitida isotrópica e sobre fundação que apresente uma camada superficial de menor permeabilidade.

V.1 TAPETE SOBRE FUNDAÇÃO PERMEÁVEL HOMOGÊNEA

A barragem pode assentar-se diretamente sobre uma camada de sedimentos grosseiros, e sendo assim o tapete deve ser dimensionado segundo o seguinte roteiro:

PRIMEIRO PASSO:

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO TAPETE

O comprimento efetivo do tapete, necessário para a obra, pode ser definido de duas maneiras:

- (a) vazões máximas admissíveis;
- (b) gradientes máximos admissíveis.

(a) Determinação do comprimento efetivo (X_r), determinado pelas vazões máximas admissíveis.

Determinadas as descargas máximas admissíveis, pode-se obter a porcentagem de redução de vazão que deverá ser feita pelo tapete. O gráfico da Figura V.2 poderá ser usado para determinação do comprimento efetivo do tapete.

Com a relação $\frac{Q_o}{K_f H}$ entra-se no gráfico e para a redução desejada da vazão obtém-se $\frac{X_r}{D}$

Sendo:

- Q_o - Vazão pela fundação sem o tapete;
- K_f - permeabilidade da fundação;
- H - nível d'água no reservatório;
- X_r - comprimento efetivo do tapete;
- D - espessura da camada permeável.

(b) Comprimento efetivo do tapete determinado pelos gradientes máximos admissíveis.

A determinação do comprimento efetivo pode estar ligada ao gradiente de saída máximo admissível (ia). Com os critérios de Lane (1935) pode-se obter valores bastante conservativos, embora possam ser utilizados como estimativa inicial. Adotando critérios de Istomina (citado por Breth e Günther, 1970) e Khosla (citado por Hammad, 1963) obtém-se os gradientes máximos admissíveis (usar o menor). Sendo assim entra-se no gráfico da Figura V.3 e determina-se o valor de $\frac{L}{H}$ e a partir deste, o comprimento efetivo do tapete (X_r), usando:

$$X_r = L - B$$

onde: L - comprimento total de percolação;

H - nível da água no reservatório;

B - comprimento de percolação abaixo da barragem;

O valor encontrado para X_r deve ser comparado com o calculado no item (a) e adotado o maior deles de modo a garantir a segurança e o bom funcionamento da barragem.

SEGUNDO PASSO:

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO REAL ÓTIMO E ESPESSURA DE UM TAPETE DE SEÇÃO TRANSVERSAL RETANGULAR

O gráfico da Figura V.4 é agora utilizado para o dimensionamento de um tapete de seção retangular. Com o comprimento efetivo (para o comprimento real ótimo) necessário ao projeto, pode-se obter no gráfico o comprimento real do tapete e o parâmetro "a" que será usado na determinação da sua espessura.

$$Z_b = \frac{K_b}{K_f D a^2}$$

Sendo: Z_b - espessura do tapete;
 K_b - permeabilidade do tapete;
 D - espessura da fundação;
 K_f - permeabilidade da fundação.

TERCEIRO PASSO:

DIMENSIONAMENTO DO TAPETE DE SEÇÃO TRANSVERSAL TRIANGULAR

As simulações feitas através do programa FPM500, que utiliza o Método dos Elementos Finitos como aproximação da solução exata, mostraram que um tapete triangular é mais eficiente do que um retangular de mesma área e mesmo comprimento. Este conhecimento pode ser usado para otimizar o projeto reduzindo custos conforme seja a geometria do vale a ser barrado. No local escolhido para a construção da barragem, a topografia pode apresentar-se de duas maneiras distintas: no primeiro caso há ocorrência de um alargamento do vale a montante do eixo da barragem. No outro caso não se verifica este alargamento.

(a) Vales com ocorrência de alargamento

Sendo o tapete triangular como mencionado acima, mais eficiente do que o retangular, pode-se então diminuir o comprimento do tapete triangular em relação ao retangular, evitando-se o prolongamento na parte alargada do vale. De acordo com a Figura IV.12, pode-se obter o comprimento e a altura da seção do tapete triangular com relação ao retangular de comprimento ótimo com a mesma eficiência, através das seguintes expressões:

$$L \text{ (Triangular) } = 0.72L \text{ (Retangular) }$$

$$Z_b \text{ (Triangular) } = 2.77Z_b \text{ (Retangular) }$$

(b) Vales sem ocorrência de alargamento

Neste caso a redução do comprimento do tapete não acarretaria maiores ganhos. Sendo assim, parte-se para a redução da área da seção transversal do tapete triangular com relação ao retangular de comprimento ótimo, obtendo a mesma eficiência. Com base no que foi mostrado na Figura IV.13:

$$L(\text{Triangular}) = L(\text{Retangular})$$

$$Z_b(\text{Triangular}) = 1.42 Z_b(\text{Retangular})$$

V.2 TAPETE SOBRE FUNDAÇÃO PERMEÁVEL COM CAMADA SUPERFICIAL DE MENOR PERMEABILIDADE

O sub-solo da região semi-árida do Nordeste brasileiro é formado pelo embasamento cristalino em mais da metade de sua extensão. Os principais açudes do Nordeste encontram-se nesta área, onde a ausência de aquíferos subterrâneos fazem dos reservatórios de superfície as únicas fontes de água nos períodos normais de estiagem ou mesmo nos anos de "seca". O regime irregular e torrencial de chuvas nesta área moldaram o seu relevo com a erosão intensa de uma infinidade de vales e grotas.

Num vale típico desta região, que atingiu o estágio de maturidade e a máxima profundidade de entalhamento, apresenta-se como mostrado na Figura V.5. Nas ombreiras existe uma camada mais superficial de solo residual maduro sobrejacente a uma camada de solo residual jovem, evidenciada pela conservação da aparência da rocha-mãe. O fundo do vale é coberto por depósitos aluvionares. A camada mais superficial do aluvião, lateral à calha do rio, é constituída de areias finas, siltes e argilas que são depositados durante os transbordamentos que inundam toda a planície aluvionar. Na camada aluvionar mais profunda, que aflora somente no leito do rio, são encontradas areias grossas e pedregulhos. O aluvião assenta-se diretamente

sobre o solo residual jovem, pois no fundo do vale não existe solo residual maduro.

As barragens construídas sobre os vales totalmente desenvolvidos devem sofrer tratamento das fundações para a obtenção da eficiência e segurança desejados. A escavação de uma trincheira com preenchimento de material compactado utilizado no maciço é a técnica usual na região. No fundo do vale a trincheira é escavada até atingir o solo residual jovem, subjacente à camada de aluvião. Nas ombreiras ela é engastada superficialmente no solo residual maduro. O dimensionamento do "cut-off" obedece aos critérios já mencionados no capítulo II.

A solução que é proposta neste trabalho, consiste em se construir um tapete impermeabilizante a montante da barragem tomando partido da camada superficial de menor permeabilidade. A calha do rio, onde aflora o aluvião grosseiro seria preenchido com o material "impermeável", garantindo a continuidade da camada superior. O preenchimento pode ser feito com o próprio material da camada superficial, caso haja condições, ou com o material utilizado na constituição do maciço. Sobre esta camada, agora tornada contínua, será construído um tapete de seção transversal triangular com o mesmo material do maciço. A solução proposta pode ser melhor visualizada nas Figuras V.5a e b.

É importante notar que caso fosse dimensionado um tapete para determinada eficiência E_1 , ao considerar-se a ocorrência da camada superficial menos permeável, obtém-se uma nova eficiência E_2 (sendo E_2 maior do que E_1). Assim, pode-se reduzir a seção do tapete diminuindo os custos e manter-se a eficiência E_1 , necessária ao projeto. Na Figura V.6 está indicada a simbologia adotada no procedimento a seguir, que segue as recomendações de Bennett (1946).

PRIMEIRO PASSO:DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO EFETIVO DO CONJUNTO
TAPETE/CAMADA SUPERFICIAL

O comprimento efetivo do conjunto camada superficial de menor permeabilidade mais o tapete artificial, pode ser definido considerando:

- (a) vazões máximas admissíveis;
- (b) gradientes máximos admissíveis.

Neste caso o comprimento efetivo do conjunto camada superficial mais tapete artificial é determinado da mesma maneira descrita no item V.1.

SEGUNDO PASSO:COMPRIMENTO EFETIVO (X_r') DA CAMADA SUPERFICIAL DE MENOR
PERMEABILIDADE

Sendo considerada a ocorrência da camada superficial de menor permeabilidade no combate a percolação, deve-se obter assim o seu comprimento efetivo. Obviamente a montante do tapete artificial, a camada deve ter comprimento tal que apresente a eficiência semelhante a um tapete infinito.

$$a = \sqrt{\frac{K_{b1}}{K_f D Z_{b1}}} \quad ; \quad X_r' = \frac{1}{a}$$

- K_{b1} - Permeabilidade da camada superficial;
- Z_{b1} - espessura da camada superficial;
- X_r' - comprimento efetivo da camada superficial;
- K_f - permeabilidade da fundação;
- D - espessura da camada permeável.

TERCEIRO PASSO:ESPESSURA INICIAL DO TAPETE (Z_{b0}), CORRESPONDENTE A CAMADA

SUPERFICIAL EXISTENTE

A permeabilidade da camada superficial (K_{b1}) e a sua espessura (Z_{b1}) são transformados para permeabilidade do tapete artificial (K_b) com a correspondente espessura, ou seja, a apartir de:

$$\frac{K_{b1}}{Z_{b1}} = \frac{K_b}{Z_{bo}}$$

obtém-se:

$$Z_{bo} = \frac{K_b Z_{b1}}{K_{b1}}$$

QUARTO PASSO:

PARAMETROS " α " e " β "

$$\alpha = \frac{K_b}{K_f D} \quad ; \quad \beta = \frac{Z_{bo}}{X_r'}$$

α - Parâmetro dependente das permeabilidades do tapete e da fundação e da espessura da fundação;

β - inclinação do tapete no final de montante do tapete artificial.

QUINTO PASSO:

COMPRIMENTO REAL DO TAPETE TRIANGULAR

O comprimento real do tapete triangular que resulta no comprimento efetivo do conjunto camada superficial mais tapete artificial desejado é dado pela seguinte expressão (a partir de Bennett):

$$L_1 = \frac{-(2\beta - 2\alpha X_r) + \sqrt{(2\beta - 2\alpha X_r)^2 - 4\alpha(2Z_{bo} - 2\beta X_r)}}{2\alpha}$$

L_1 - Comprimento real do tapete artificial;
 X_r - comprimento efetivo do conjunto camada superficial e tapete artificial.

SEXTO PASSO:

ALTURA DO TAPETE DE SEÇÃO TRANSVERSAL TRIANGULAR

Determinado o comprimento real do tapete, obtém-se então, a altura da seção transversal do tapete triangular correspondente ao comprimento efetivo desejado:

$$Z_b = \frac{\alpha L_1^2}{2} + \beta L_1$$

SÉTIMO PASSO:

VERIFICAÇÃO DOS GRADIENTES DE SAÍDA PARA O TRECHO EM QUE A CAMADA SUPERFICIAL DE MENOR PERMEABILIDADE APRESENTA-SE A JUSANTE DA BARRAGEM

O cálculo do gradiente pode ser determinado como foi indicado no Capítulo IV:

$$i_s = \left[\frac{H X_r'}{Z_{b1}(X_r + X_r' + B)} \right]$$

H - Nível da água no reservatório;

X_r' - comprimento efetivo da camada superficial a jusante (igual ao comprimento efetivo a montante);

X_r - comprimento efetivo a montante (camada superficial/tapete artificial);

Z_{b1} - espessura da camada superficial a jusante da barragem;

B - comprimento de percolação abaixo da base da barragem.

Verifica-se então se este gradiente é compatível com experiências anteriores, como as de Turnbull e Mansur, recomendando-se como gradientes de saída máximos (Sandroni,

1988):

- Camada superficial submersa a jusante: $is(max) = 0$.
- Camada superficial emersa a jusante: $is(max) = 0.40$

OITAVO PASSO:

DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO REAL DO PREENCHIMENTO DA CALHA DO RIO

$$L_2 = \frac{2.3}{a}$$

L_2 - Comprimento real do preenchimento da calha do rio.

Obs. Evidentemente o comprimento L_2 não poderá ser menor do que L_1 .

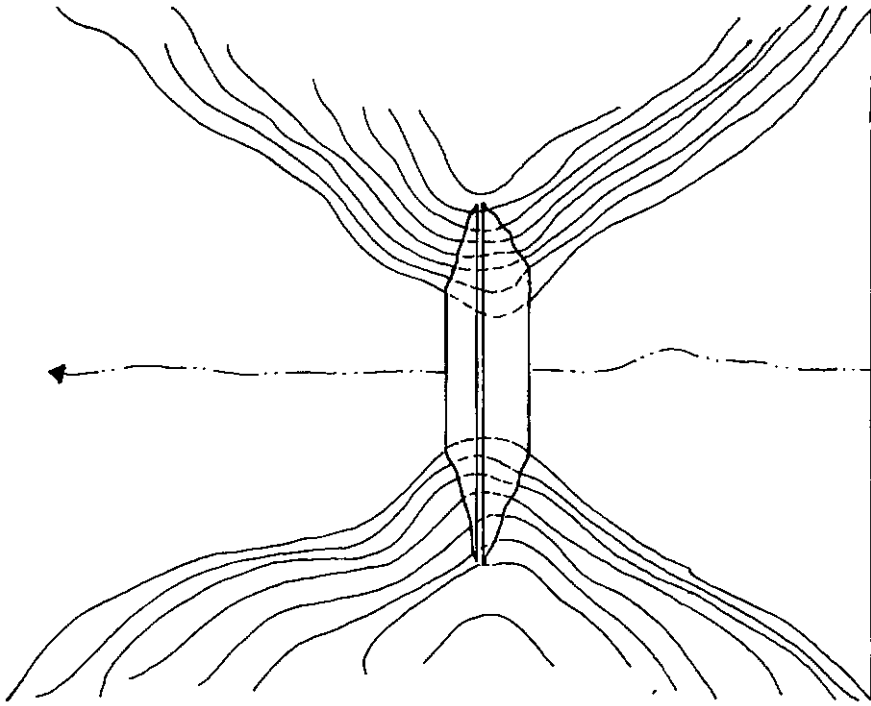
V.3 OBSERVAÇÕES FINAIS

Este roteiro visa otimizar o dimensionamento de tapetes impermeáveis, reduzindo o volume de material utilizado, ao mesmo tempo garantindo a eficiência desejada. A execução de um tapete deve, no entanto ser acompanhada das devidas precauções para que as hipóteses adotadas no dimensionamento sejam válidas. Uma falha na continuidade do tapete poderia comprometer em muito a eficiência desse dispositivo.

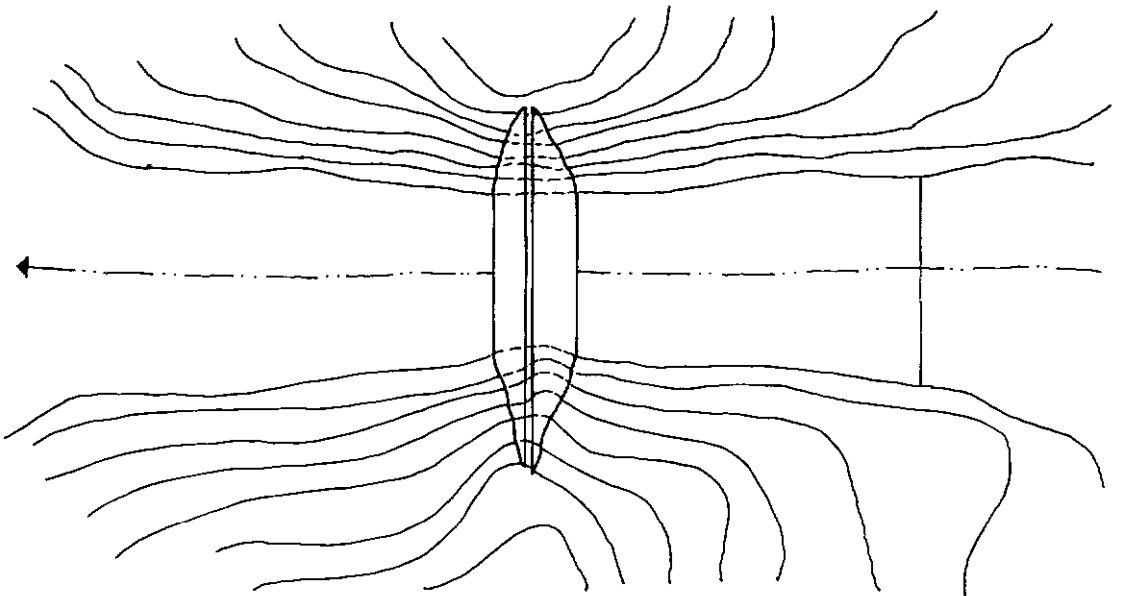
Para fundações homogêneas os gradientes de saída podem apresentar valores abaixo dos críticos. Isto se deve ao fato de que o enrocamento de pé tem sua altura em torno de um terço do nível da água, como recomendado pelo Bureau of Reclamation (1965). Entretanto, como foi visto no Capítulo IV, os gradientes crescem bastante com a anisotropia da fundação.

Após o dimensionamento do tapete, é possível fazer uma comparação com a solução em "cut-off", analisando custo

e eficiência, escolhendo o dispositivo que apresente o menor gasto e a eficiência necessária. Nesta comparação não deve ser esquecido que custos com o "cut-off" podem se tornar bastante altos, em situações onde seja necessário a execução de rebaixamento de lençol freático.



(a)



(b)

Figura V.1 Desenho esquemático dos vales nordestinos

(a) com alargamento

(b) sem alargamento

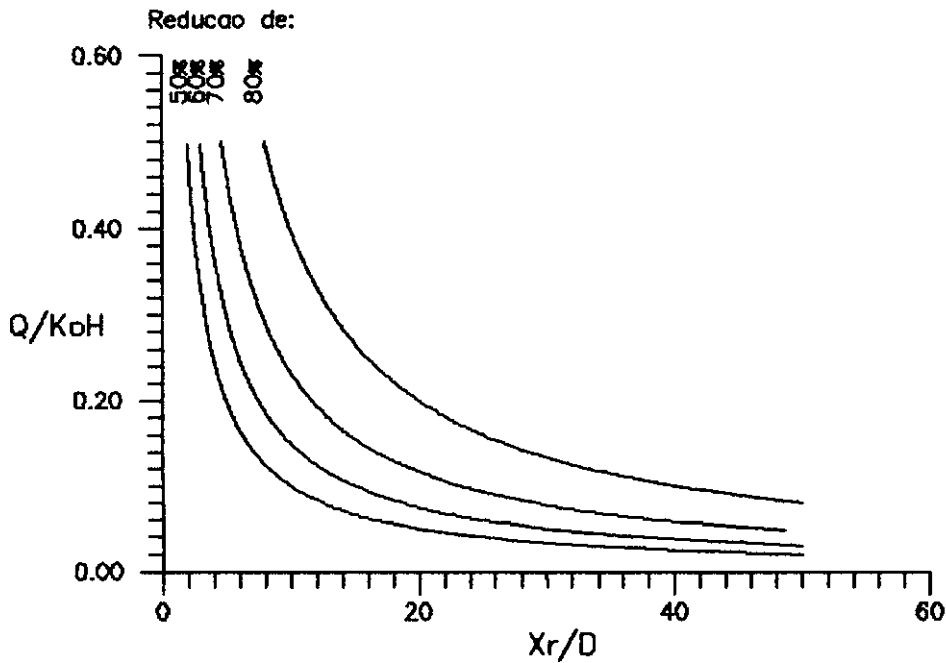


Figura V.2 Comprimento efetivo determinado pela vazão máxima admissível

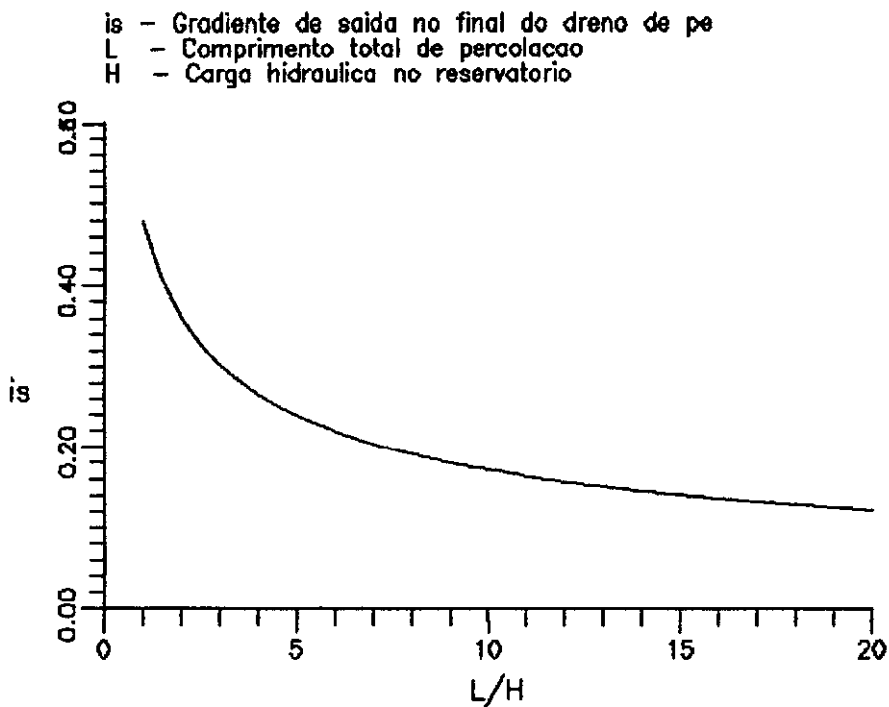


Figura V.3 Comprimento efetivo determinado pelo gradiente máximo admissível

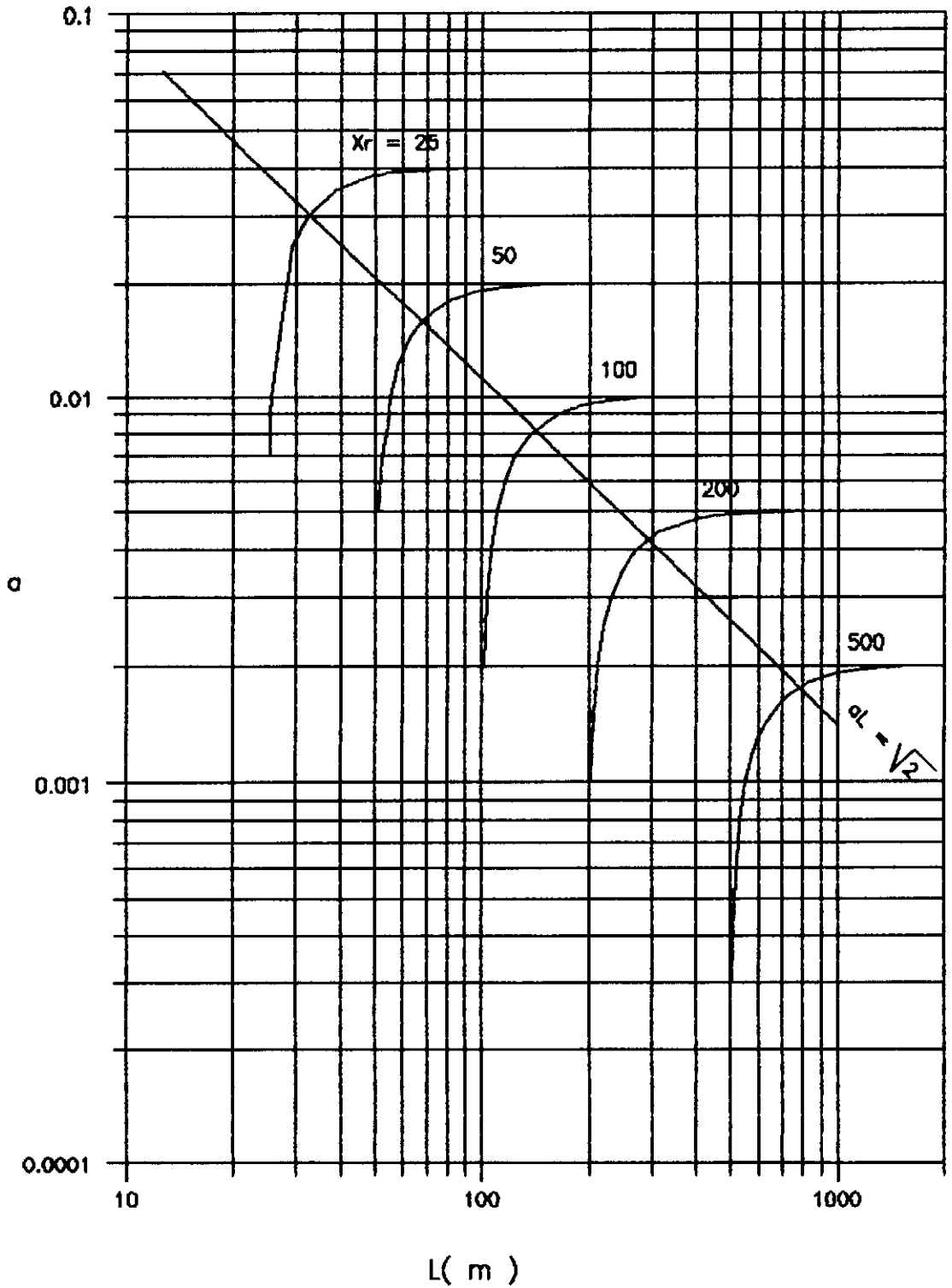


Figura V.4 Determinação do parâmetro "a" e do comprimento real do tapete retangular

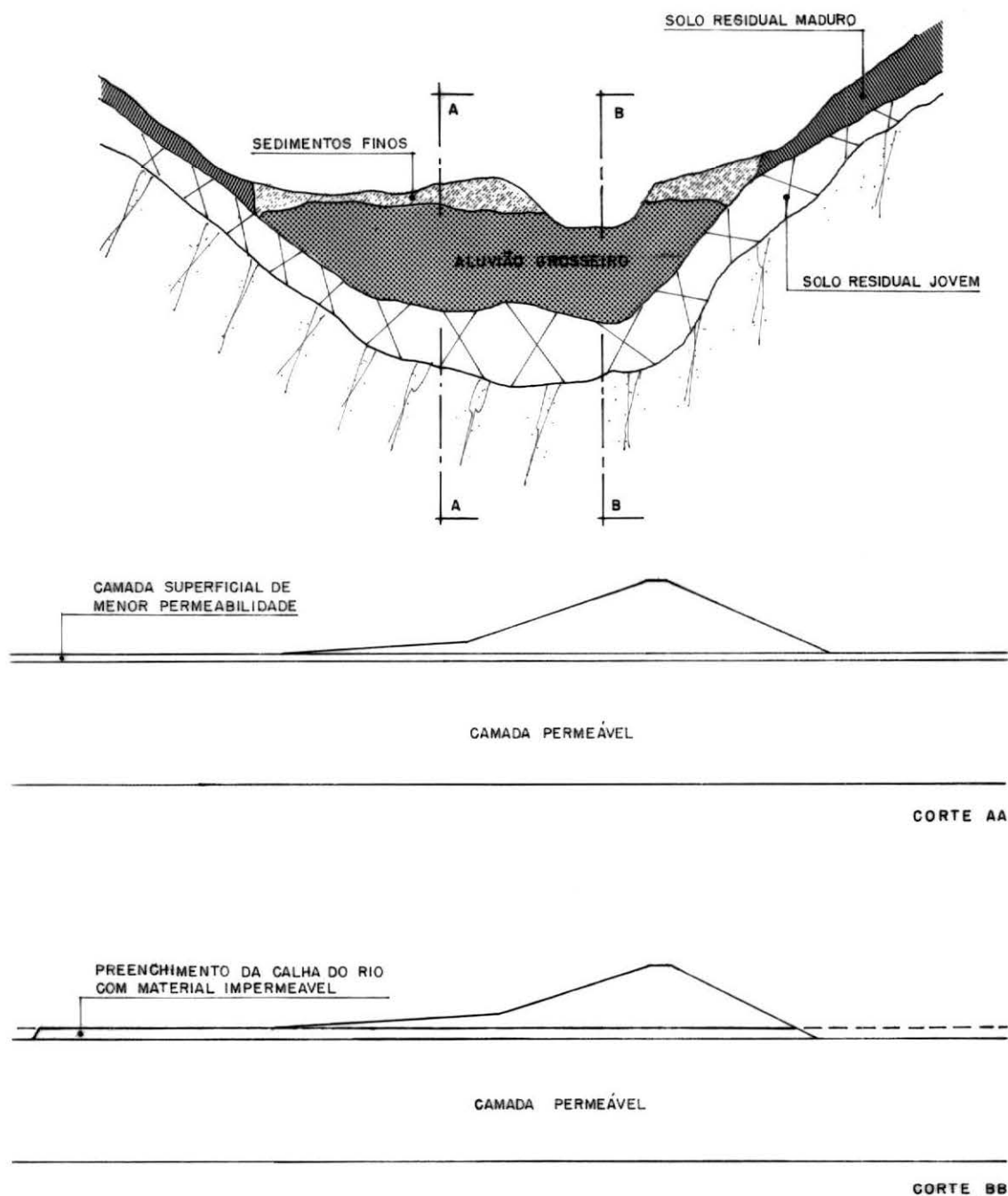


Figura V.5 Vale nordestino (característico) totalmente desenvolvido

(a) Solução regional (corte AA)

(b) Solução regional (corte BB)

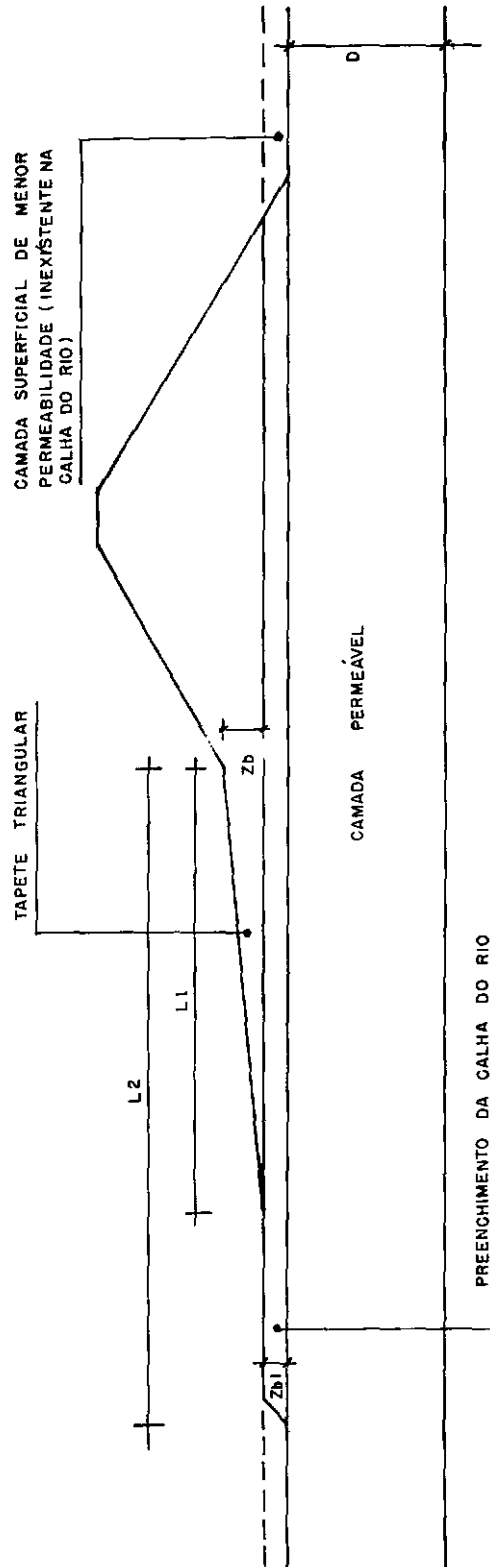


Figura V.6 Simbologia adotada no item V.2 (Tapete sobre Fundação Permeável com Camada Superficial de Menor Permeabilidade)

CAPITULO VI

BARRAGEM DO CARÃO

Neste capítulo será utilizado um caso real para verificação do método de Bennett (1946), com a aplicação do MEF à Barragem do Carão. Esta barragem, localizada no Município de Tamboril-Ce, foi construída pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas - DNOCS, para abastecimento da cidade de Tamboril. A bacia do rio Acaraú, com 284 Km² até o ponto barrado, situa-se numa zona muito seca, caracterizada por chuvas anuais inferiores a 750mm. Os rios do Nordeste apresentam um curto período de escoamento correspondente à estação das chuvas. Cessadas as chuvas os rios deixam de correr. Torna-se assim, necessária a construção de reservatórios para garantir o abastecimento de água no restante do ano ou nos anos de seca. Esta é a principal finalidade da barragem objeto deste capítulo.

Estudos realizados no local da barragem permitiram a seguinte descrição do sítio geotécnico (DNOCS, 1982):

"De maneira geral a fundação possui uma camada superficial constituída por areia grossa com pedregulhos - solo sedimentar recente transportado ao local por agentes fluviais ou de gravidade, seguida por uma camada de origem sedimentar de deposições pretéritas, constituída por areias argilosas e siltosas, sob a qual define-se o solo residual de gnaiss, constituído por areias argilosas com pedregulhos.

No perfil geotécnico correspondente ao eixo da barragem, observa-se que a camada permeável superior a quem se subordinam em primeira escala os fluxos subsuperficiais, apresenta-se ao longo de 100m."

Como a barragem iria se apoiar sobre uma camada de aluvião permeável de espessura razoável quando comparado

com a dimensão da obra, dispositivos de controle de percolação foram projetados para a obtenção da redução da vazão e garantir segurança da obra.

Estudos realizados pelos projetistas da barragem, demonstraram que a penetração total no aluvião teria um custo elevado pela necessidade da realização do rebaixamento do lençol freático. Optou-se assim, pela construção de um tapete impermeável a montante, em conjunto com um "cut-off" parcial com aproximadamente um terço de penetração no estrato permeável. A seção da barragem é apresentada na Figura VI.1.

São apresentados a seguir a análise feita pelo MEF e a aplicação do método de Bennett.

VI.1 ANÁLISE PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Como a camada de aluvião permeável não é interceptada totalmente, o fluxo da água ocorre preferencialmente pela fundação. A análise deste fluxo pela fundação foi feita com a ajuda das medidas de pressão da água obtidas em um conjunto de piezômetros tipo Casagrande instalados na obra. A localização destes piezômetros (em planta) está indicada na Figura VI.2. O exame das leituras piezométricas permitiu concluir que o fluxo se processa quase horizontalmente. Na Figura VI.3 estão graficamente indicados os valores médios das medidas piezométricas em agosto de 1984. Estes valores médios foram usados para ajustar as permeabilidades dos materiais na análise pelo MEF.

As sondagens geotécnicas indicaram uma camada de silte a jusante do eixo da barragem. A espessura da camada de silte varia desde poucos centímetros até alguns metros. Com o intuito de representar o mais fielmente possível a percolação pela fundação, foi adotada uma espessura média de 1.2m para a camada de silte com a configuração

apresentada na Figura VI.4. A espessura total do manto permeável é de 12.0m, como indicada no projeto inicial da barragem. Assim, os materiais presentes nas simulações são os seguintes: solo compactado do corpo da barragem e do tapete impermeabilizante, aluvião permeável, aluvião superficial menos permeável (camada de silte) e o tapete drenante. A malha de elementos finitos utilizada nas simulações pode ser vista na Figura VI.5

Os resultados obtidos pela aplicação do MEF (pressão e vazão) aproximaram-se dos resultados medidos no campo. As pressões calculadas estão também indicadas na Figura VI.3 de modo a permitir a comparação com as médias das leituras dos piezômetros. A vazão, pela fundação, calculada pelo MEF (após o ajustamento do K) e a vazão medida no campo estão indicadas a seguir.

Vazão pela Fundação	CAMPO	MEF
(l/s)	44.50	45.27

Os ensaios de permeabilidade efetuados na camada aluvionar resultam nos seguintes coeficientes:

- Aluvião mais fino: $K = 10^{-6} \text{ m/s}$;
- Aluvião mais grosseiro: $K = 10^{-5} \text{ m/s}$.

Algumas equações que determinam as permeabilidades dos solos, de acordo com a sua granulometria, foram usadas para estimar o coeficiente de permeabilidade do aluvião:

$$\text{Hazen (citado por Taylor, 1948): } K = 100 D_{10}^2$$

$$\text{U. S. Army Corps of Engineers (citado por Lopes, 1974): } K = 45 D_{50}^2$$

A determinação de permeabilidade baseada no diâmetro

efetivo foi feita no Vale do Rio Mississippi (Mansur e Kaufman, 1962).

De acordo com estes resultados a permeabilidade média, segundo as curvas granulométricas do solo da fundação, é a seguinte:

$$\text{Hazen: } K = 5.70 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$\text{U.S. Army Corps of Engineers: } K = 2.82 \times 10^{-3} \text{ m/s}$$

De acordo com as simulações feitas pelo MEF, a permeabilidade média do aluvião (resultados retroanalizados) apresentou a seguinte grandeza:

$$K_h = 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$K_v = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

A simulação através do MEF mostra que o comprimento efetivo do tapete coincide com o comprimento real, como demonstra o gradiente quase constante ao longo da base do tapete (Figura VI.3). Sendo possível concluir que a contribuição do fluxo vertical pelo tapete é insignificante, na formação da vazão pela fundação.

VI.2 COMPARAÇÃO COM O MÉTODO DE BENNETT (1946)

Como visto no Capítulo IV, os tapetes a montante de barragens têm um comprimento efetivo (definido por Bennett) igual ou menor que o seu comprimento real. Pelo método de Bennett é também possível se determinar o gradiente na base do tapete para fundação homogênea de seção constante. A Barragem do Carão possui o tapete formado com o mesmo material do maciço e mesmo grau de compactação, portanto apresentam o mesmo coeficiente de permeabilidade. Os dados do tapete, utilizados para o cálculo do comprimento

efetivo, são apresentados a seguir:

K_b (permeabilidade do tapete) = 10^{-8} m/s

K_f (permeabilidade da fundação) = $6 \cdot 10^{-4}$ m/s

D (espessura do estrato permeável) 12.0m

Z_b (comprimento real do tapete) = 50.0m

O cálculo do comprimento efetivo (X_r) do tapete pelo método de Bennett é feito como indicado a seguir:

$$\alpha = \frac{K_b}{K_f D} = \frac{10^{-8}}{6 \cdot 10^{-4} \cdot 12.0} = 1.389 \times 10^{-6} / \text{m}$$

$$Z_b = \frac{\alpha L^2}{n(n-1)}, \quad X_r \simeq 50.0 \text{m}$$

O resultado obtido para o comprimento efetivo do tapete é igual ao seu comprimento real. Apesar das simplificações feitas pelo método de Bennett que não leva em conta a anisotropia da fundação e a existência de um "cut-off" parcial, o comprimento efetivo do tapete, como ocorreu com o resultado do MEF, também coincide com o comprimento real.

VI.3 CONCLUSÃO

A Barragem do Carão constituiu-se no caso prático apresentado pelo presente trabalho, no qual foi aplicado o Método dos Elementos Finitos em comparação com a teoria de Bennett.

Através do program FPM500 foi possível determinar o gradiente na base da barragem. Ao longo da base do tapete o gradiente se apresentou aproximadamente constante, mostrando não haver contribuição de fluxo vertical pelo tapete. A vazão obtida nas simulações também muito se aproximou das medidas no campo.

Com a aplicação da teoria de Bennett foi possível também se determinar a coincidência do comprimento efetivo com o comprimento real. Nestes casos algumas simplificações foram admitidas no que diz respeito a anisotropia do solo de fundação, superfície parabólica do tapete e existência do "cut-off" parcial. Estes resultados confirmam a aplicabilidade do método de Bennett no dimensionamento de tapetes impermeáveis.

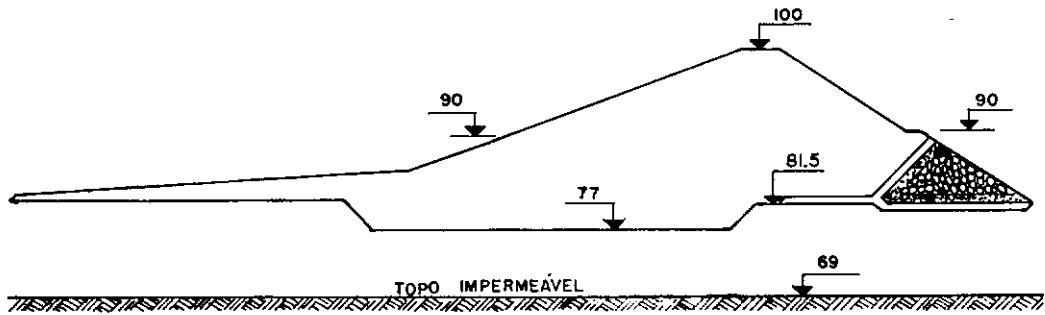


Figura VI.1 Seção típica da Barragem do Carão

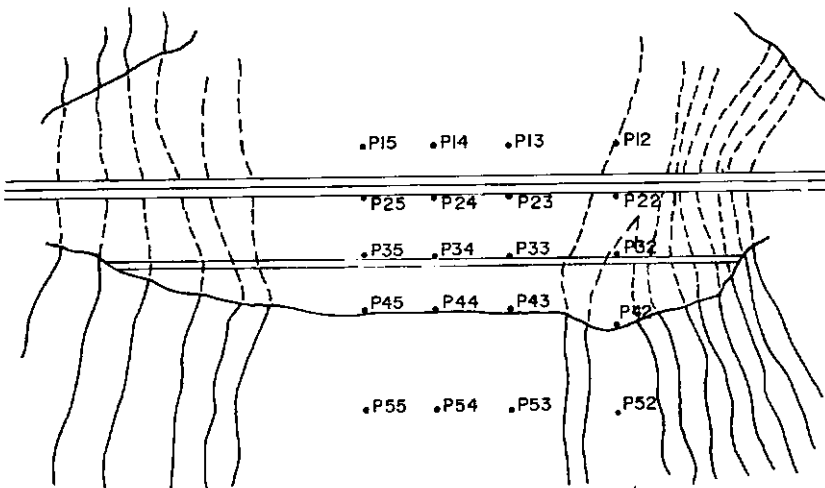
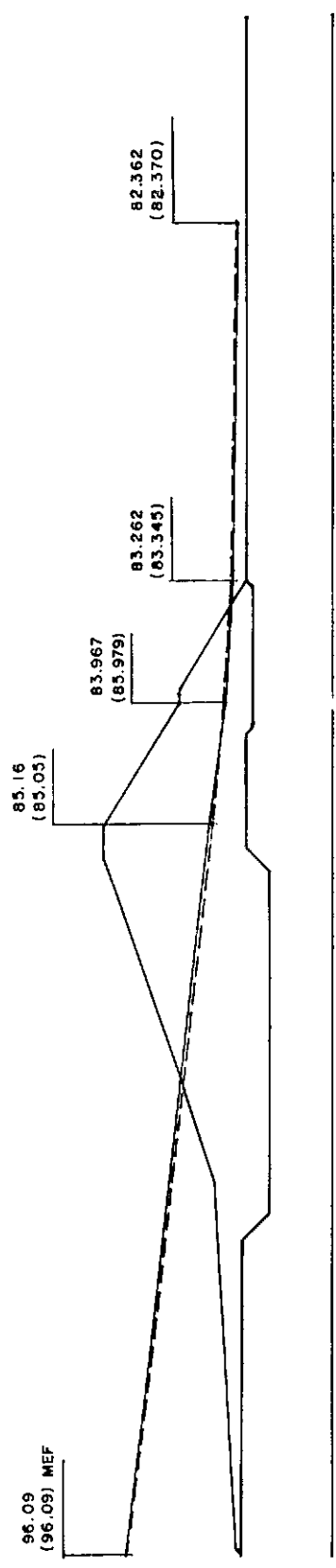


Figura VI.2 Localização dos piezômetros da Barragem do Carão



PERMEABILIDADES

FUNDAÇÃO	$K_h = 6 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
	$K_v = 1 \times 10^{-4} \text{ m/s}$
MAGIÇO	$K_h = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
TAPÊTE	$K_v = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}$
SILTE	$K_h = 2.5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$
	$K_v = 2.5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$

Figura VI.3 Gradiente na fundação da Barragem

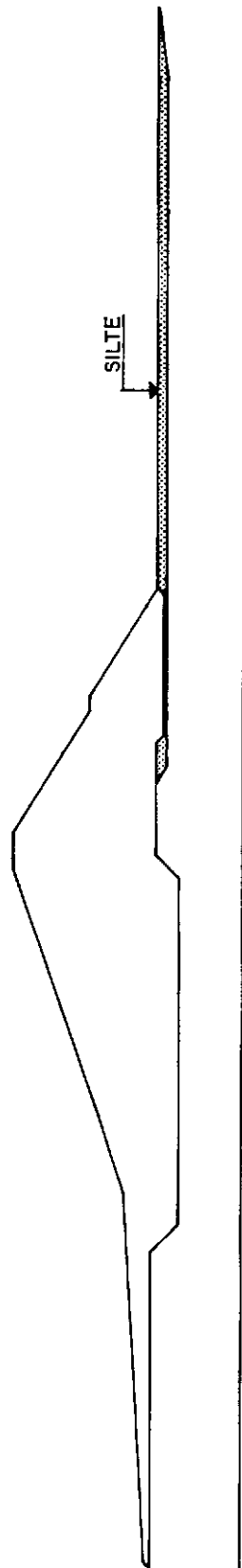


Figura VI.4 Localização e forma adotada para a camada de silte

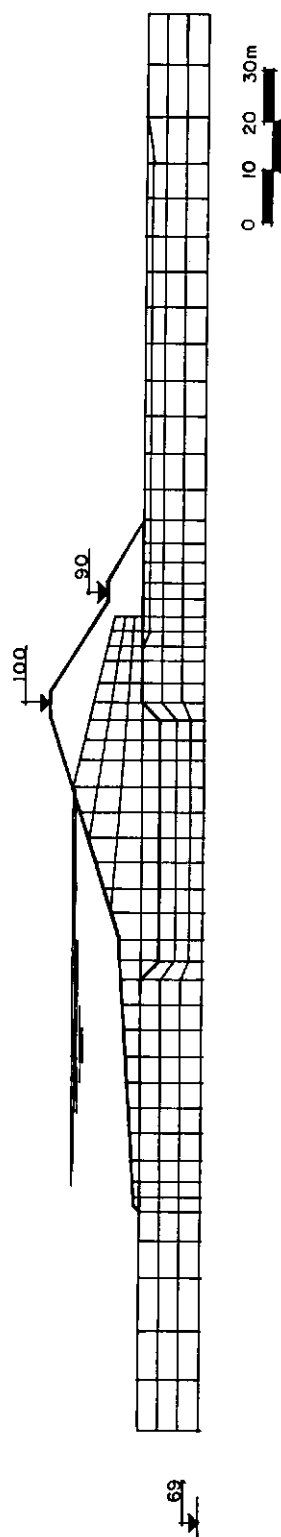


Figura VI.5 Malha de elementos finitos

CAPITULO VII

CONCLUSÕES E PESQUISAS RECOMENDADAS

O objetivo desta pesquisa foi o de avaliar os conhecimentos sobre tapetes impermeabilizantes a montante de barragens, utilizando o Programa FPM500, que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). São apresentados neste trabalho os dispositivos de controle de percolação pela fundação aluvionar de uma barragem: interceptação total, interceptação parcial e elementos drenantes. Entre estes dispositivos, o tapete impermeável é o tema desta dissertação.

O tapete impermeabilizante a montante de barragens é um dispositivo que aumenta o comprimento de percolação com a consequente redução da vazão e das forças de percolação. Os métodos e critérios para o dimensionamento deste dispositivo são baseados, justamente na busca destas reduções. Os métodos de dimensionamento de tapetes foram analisados através de simulações pelo MEF. Estes métodos são divididos quanto ao enfoque: vazão, gradientes verticais de saída comprimento efetivo.

VII.1 CONCLUSÕES

Barragens que utilizam o tapete impermeável a montante têm a perda d'água realizada preferencialmente pela fundação. Sendo assim os métodos de dimensionamento podem ser fundamentados no índice de redução de vazão desejado para determinada obra. Neste trabalho verificou-se que o cálculo da vazão pela aplicação direta da lei de Darcy apresentou-se muito conservadora, principalmente para valores baixos da relação entre o comprimento total de percolação e a espessura do estrato permeável. Para valores baixos (próximos de 1) desta relação, a proposta de Pavlovsky-Dachler (citados por Davidenkoff, 1964), com base

na lei de Darcy, para cálculo da vazão em fundações de barragens, mostrou-se mais próxima das simulações pelo MEF. Turnbull e Mansur (1959) também baseados na lei de Darcy, apresentaram uma fórmula cujos resultados, comparados com os obtidos pelo MEF, mostraram-se mais aproximados para valores altos da relação entre o comprimento total de percolação e a espessura da camada permeável. Portanto conclui-se que no tocante a vazão a proposta de Turnbull e Mansur (1959) é mais recomendada para o dimensionamento de tapetes, já que o comprimento total de percolação, na maioria das vezes, mostram-se bem superiores à espessura da fundação.

Seguindo procedimentos empíricos, vários autores sugeriram critérios para o dimensionamento de barragens sobre fundações permeáveis com base nos gradientes médios ou nos gradientes de saída da fundação. Lane (1935) determinou coeficientes mínimos para cada tipo de solo. Para valores inferiores a estes coeficientes a fundação da barragem poderia sofrer processo de entubamento ("piping"). No estudo de Lane, no entanto, são determinados os gradientes médios e não os de saída, que na realidade são os causadores do carreamento. Istomina (citado por Breth e Günther, 1970) preocupou-se com a quantidade de finos presentes na fundação, que poderiam sofrer processos de lavagem com a criação de tubos. Assim ele apresentou gradientes de saída máximos de acordo com o coeficiente de uniformidade do solo de fundação. Os dados de Istomina não podem por si só determinar o comprimento total de percolação, pois para valores de coeficiente de uniformidade baixos, os gradientes de saída permissíveis podem, no entanto, apresentar-se superiores aos permitidos quanto à ocorrência de "piping". Também Khosla (citado por Hammad, 1963) apresentou fatores de segurança para os gradientes de saída críticos que podem ser utilizados principalmente para obras de maior responsabilidade. Pouco existe a respeito de fundações com camada superior de menor permeabilidade, que podem sofrer levantamentos a jusante, provocados por excessivas pressões na água. Turnbull e

Mansur (1959) apresentaram condições de percolação nos diques do rio Mississippi, para os quais observou-se gradientes de saída que correspondia desde reduzida percolação até processos de borbulhamento. Entretanto não se pode generalizar, pois cada fundação possui um tipo de solo diferente. Recomendou-se, entretanto no Capítulo V, valores de gradientes de saída máximos compatíveis com a segurança das barragens.

A metodologia proposta por Bennett, que introduziu o conceito de comprimento efetivo, tem a vantagem de permitir a obtenção do volume mínimo de material para a segurança desejada da obra. Como esta pesquisa limitou-se a fundações homogêneas e isotrópicas, pôde-se confirmar a validade da teoria de Bennett para tapete de seção transversal retangular. Devido a dificuldades matemáticas, Bennett simplificou a determinação do comprimento efetivo para tapetes triangulares. Os resultados obtidos através do MEF distanciaram-se dos de Bennett, principalmente para tapetes próximos do comprimento ótimo do tapete retangular. Isto ocorreu, porque Bennett em suas simplificações, admite a superfície do tapete triangular em forma de parábola. No entanto para comprimentos maiores, mantendo-se a mesma área, os resultados apresentam-se convergentes, pois neste caso a parábola se aproxima de uma reta como também para pequenos comprimentos, pois a eficiência se aproxima do comprimento real mesmo com as simplificações adotadas.

Foi também possível determinar a relação entre o comprimento efetivo de um tapete retangular (comprimento ótimo) e um triangular. Concluiu-se que um tapete triangular é mais eficiente e assim é proposto um roteiro de tratamento de fundações permeáveis para os vales característicos do Nordeste, com a utilização de tapetes a montante. Foram examinados dois tipos de vales. Vales que mantêm a mesma largura a montante da barragem e vales que apresentam um considerável alargamento. Para vales sem alargamento concluiu-se ser mais vantajoso adotar um tapete de seção triangular que em relação ao retangular ótimo

apresenta a mesma eficiência com redução do volume de material compactado pela diminuição da área da seção. Nos vales com alargamento, evidentemente deve-se reduzir o comprimento do tapete triangular em relação ao retangular ótimo obtendo a mesma eficiência e evitando-se a construção do tapete na parte alargada do vale. Ainda para os vales característicos do Nordeste brasileiro, que comumente apresentam na superfície da planície aluvionar solos de menor permeabilidade, recomenda-se a utilização do método de Bennett para tapetes sobre camada superficial de menor permeabilidade.

Com a aplicação do método de Bennett e do MEF a um caso real, foi possível determinar que o comprimento efetivo do tapete da Barragem do Carão coincidia com o seu comprimento real. Isto também mostra a validade da teoria de Bennett (1946).

Em suma, as conclusões são as seguintes:

- valores conservativos da aplicação simples da lei de Darcy;
- Pavlovsky-Dachler é melhor para valores baixos de "r";
- Turnbull e Mansur melhor para valores maiores de "r";
- O gradiente vertical de saída no pé de jusante da barragem cresce com o grau de anisotropia da fundação;
- tapete triangular mais eficiente do que o retangular segundo o MEF;
- para vales com alargamento a montante deve-se utilizar o tapete triangular de menor comprimento e mesma eficiência do tapete retangular ótimo;
- para vales sem alargamento a montante deve-se utilizar o tapete triangular de mesmo comprimento do retangular ótimo com redução da área da seção transversal;

VII.2 PESQUISAS RECOMENDADAS

As conclusões obtidas são limitada às fundações homogêneas e isotrópicas. Recomenda-se portanto, que sejam realizadas novas pesquisas sobre fundações heterogêneas e anisotrópicas. Neste caso poderão ser utilizados dados reais de barragens construídas sobre fundações com estas características de modo a se obter uma melhor representação da realidade.

Um maior aprofundamento se faz necessário no conhecimento a respeito de gradientes de saída. Esta variável, que comanda a segurança das barragens em relação ao "piping", poderia ser melhor estudada pela observação de barragens já construídas, e também com a aplicação de programas que possibilitem a análise de tensão e deformação, com os quais seria possível determinar, por exemplo, as condições de formação de areia movediça. Como sugestão, poderia ser utilizado o Programa UNSTRUCT (Miranda, 1989).

A utilização do Método dos Elementos Finitos com efeitos tridimensionais poderia levar a conclusões mais próximas do real, contribuindo para o aperfeiçoamento da engenharia de barragens.

Finalmente, uma maior observação de campo em barragens do Nordeste, com o objetivo de um melhor conhecimento do comportamento dos solos desta região e conseqüentemente redução dos custos das obras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, P. C. (1976) - "Análise da Percolação na Barragem de Curuá-Una pelo Método dos Elementos Finitos" - Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro - RJ

AREAS, O. M. (1961) - "Investigações e Problemas das Fundações da Barragem de Três Marias. I Seminário Nacional de Grandes Barragens

BENNETT, P. T. (1946) - "The effect of blankets on seepage through pervious foundations" - Transactions. American Society of Civil Engineers

BHATIA, S. K. and EL-DIN, K. (1989) - "In situ measurement of permeability of slurry walls. Proceedings of the Twelveth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Rio de Janeiro, 1989.

BOWLES, J. E. (1984) - "Physical and Geotechnical Properties of Soils" - International Student Edition

BRETH, H. and GÜNTHER, K. (1970) - "About the safety from subsurface erosion of earth dams subjected to underseepage" Tenth International Congress on Large Dams. ICOLD

BROWN, E. L., CONEAU, W. (1970) - "Construction of a Grouted Cut-off Through a Talus Zone" - Tenth International Congress on Large Dams

BUREAU OF RECLAMATION (1965) - "Design of Small Dams" - United States Department of the Interior

CARVALHO, A., MUNIZ, R., HOKANA, R. (1976) - "Construção do Diafragma Plástico da 2a. Barragem de Joanes"

CARVALHO, L. H., GUEDES, J. A., PAULA, J. R. (1981) - " XIV

Seminário Nacional de Grandes Barragens", C.B.G.B. Agosto, Recife.

CASAGRANDE, A. (1961) - "Control of Seepage Through Foundations and Abutments of Dams" - First Rankine Lecture. Geotechnique

CASAGRANDE, A. (1935) - Discussão de "Security from Under-seepage Masonry Dams on Earth Foundations" - Transactions. American Society of Civil Engineers

CEDERGREN, H. R. (1967) - "Seepage, Drainage and Flow Nets" John Wiley and Sons, New York

CEDERGREN, H. R. (1972) - "Seepage Control in Earth Dams" - Embankment Dam Engineering, Casagrande Volume

DAVIDENKOF (1964) - "Deiche und Erudämme - Sickerströmungs-Standsicherheit" - Werner-Verlag-Düsseldorf

DESAI, C. S. (1979) - Elementary Finite Element Method-Prentice Hall, Inc.

DNOCS (1982) - "Açude Público Carão - Relatório Final dos Estudos Geotécnicos". Serviços Integrados de Assessoria e Consultoria Ltda (SIRAC)

DREVILLE, F. L., PARE, J. J., CAPELLE, J. F., DASCAL, O. and LAROCQUE, G. S. (1970) - "Diafragma en Béton Monlé pour L'étanchéité des Foundations du Barrage Manicouagon 3" - Tenth International Congress on Large Dams - ICOLD

ESTEVES, V. P. (1961) - "Barragens de Terra". Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.

FERRARI, I. (1973) - "Considerações sobre o projeto e construção da barragem de terra de Curuá-Una" - Seminário Nacional de Grandes Barragens - C.B.G.B. , Rio de Janeiro

FUMIÔ, B. L. C. (1982) - "Barragens de Terra sobre Solos Porosos: Análise de Soluções de Drenagem na Fundação". Tese de mestrado. COPPE/UFRJ, fevereiro/1982.

GAMBOA, J., ROLDAN, D. and ALBA, P. - "Observed Behavior of a Dam on Deep Aluvial Deposits" - Tenth International Congress on Large Dams - ICOLD

HAMMAD H. Y. (1963) - "Seepage and Dams" - Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., July

HARR, M. E. (1962) - "Groundwater and Seepage" - McGraw-Hill Book Company, Inc.

JASPAR, J. L. and RIENGHEIN, A. S. (1953) - "Steel Sheet Piling Studies" - III International Conference on S.M.F.E., Zurich, vol. II

KHAN, S. N. and ALINAQUI, S. (1970) - "Foundation Treatment for Underseepage Control of Tarbela Dam Project" - Tenth International Congress on Large Dams - ICOLD

LANE, E. W. (1935) - "Security from under-seepage masonry dams on earth foundations" - Transactions. American Society of Civil Engineers

LOPES, F. R. (1974) - "Análise de Escavações Escoradas pelo Método dos Elementos Finitos". Tese de Mestrado (COPPE/UFRJ)

MANSUR, C. I. and KAUFMAN, R. I. (1962) - "Dewatering". Capítulo 3 do "Foundations Engineering" - Leonards. McGraw-Hill Book Company, Inc.

MARSAL, J. R. and REZENDIZ, D. (1971) - "Effectiveness of Cut-offs in Earth Foundations and Abutments of Dams" IV Panamerican Conference on S.M.F.C., Puerto Rico, vol III

MIDDLEBROOKS and JERVS (1947) - "Relief - Wells for Dams

and Levees - Transactions A.S.C.E.

MIRANDA, A. N. (1983) - "Barragens no Semi-Árido" - Boletim Técnico, Recursos Hídricos. Universidade Federal do Ceará

MIRANDA, A. N. (1989) - "Programa UNSTUCT - Análise de Tensões e Deformações em Solos Saturados e Não-Saturados". Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-Ce

ROLDÃO, J. S. F. e LOPES, N. A. F. (1989) - "Potencialidades do Emprego de Traçadores na Solução de Problemas de Percolação". Simpósio sobre Novos Conceitos em Ensaios de Campo e Laboratório. COPPE/UFRJ

SANDRONI, S. S. (1988) - "COC739-Barragens de Terra e Enrocamento". PEC-Mecânica dos Solos, COPPE/UFRJ

SERAFIM, J. L. and CARVALHO, A. P. (1970) - "Studies for the Design of Massingir Dam" - Tenth International Congress on Large Dams - ICOLD

SERAFIM, J. L. (1982) - "Elements for Thorough Statistical Analysis of Dam Failures" - Separata da revista da Universidade de Coimbra, vol XXIX

SHERARD, J. L., WOODWARD, R. J., GIZIENSKI, S. F. and CLEVINGER, W. A. (1963) - "Earth and Earth-Rock Dams" - John Wiley and Sons

TAYLOR, R. L. and BROWN, C. B. (1967) - "Darcy Flow Solutions with a Free Surface". Journal of the Hydraulics Division A.S.C.E., march

TAYLOR, D. W. (1948) - "Fundamentals of Soil Mechanics" - John Wiley and Sons, New York

TERZAGHI, k. and PECK, R. B. (1967) - "Soil Mechanics in Engineering Practice" - John Wiley and Sons

THORFINNSEN, S. T. (1959) - "Underseepage Control at Fort Randall Dam" - Transactions. American Society of Civil Engineers

TURNBULL, W. J. and MANSUR, C. I. (1959) - "Investigations of Underseepage - Mississippi River and Levees" - A.S.C.E., Part I, vol 126

TURNBULL, W. J. and MANSUR, C.I. (1961) - "Relief Well Systems for Dams and Levees" - Transactions. American Society of Civil Engineers

URAL, O. M., SERTGIL, S., ÖZIL, S. (1967) - "The Foundation and Seepage Problems of Altinapa Dam". Neuvième Congrès des Grands Barrages/Istanbul. ICOLD

WILSON, S. D. and MARSAL, R. J. (1979) - "Current Trends in Design and Construction of Embankment Dams". American Society of Civil Engineers